



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

MADRID

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN

Diseño de un sistema de comunicaciones MIMO
masivo multiusuario

Autor:
Tamara Coello Garrido

Tutor:
Matilde Pilar Sánchez Fernández

Leganés, Julio 2016



Universidad
Carlos III de Madrid



Resumen

Hoy en día, las tecnologías inalámbricas tienen gran importancia en la sociedad. Es por esto por lo que se busca la manera de mejorar los servicios que aportan y de aumentar el número de usuarios permitidos para estas comunicaciones.

El principal objetivo del presente documento es conocer cómo mejora la tecnología MU-MIMO (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) con el incremento del número de usuarios que pertenecen al sistema.

Para ello en primer lugar se realizará un estudio de la evolución de la tecnología MU-MIMO. Primero se analizará cómo se consiguió llegar al origen de MIMO o SU-MIMO (Single-User Multiple-Input Multiple-Output), mediante las tecnologías SISO (Single-Input Single-Output), MISO (Multiple-Input Single-Output) y SIMO (Single-Input Multiple-Output).

Posteriormente se realizará un estudio de cómo se comporta un sistema SU-MIMO y en qué se diferencia de MU-MIMO. También se tratará como MU-MIMO mejora la tecnología MIMO y las categorías en las que se divide y se realizará un estudio matemático del canal MIMO que se va a utilizar en las simulaciones.

Por último, se realizarán unas simulaciones. Estas simulaciones se realizarán con un escenario definido por un número variable de usuarios que transmiten a una estación base, que adquiere el papel del receptor. En este escenario, los usuarios tienen 10 antenas colocadas en vertical mientras que la estación base recibe con un array de 100 antenas.

En estas simulaciones se analizarán principalmente dos características en el enlace ascendente: la dispersión angular del receptor y la capacidad del canal.

El objetivo de las simulaciones es observar como la dispersión angular adquiere una distribución uniforme según va aumentando el número de usuarios, frente a la distribución Gaussiana que tiene con un número bajo de usuarios. Y por otra parte, observar como este hecho permite que la capacidad del sistema mejore.



Universidad
Carlos III de Madrid



Abstract

Nowadays, wireless communication has a great importance in the society, for this reason it's necessary to look for a new technology that improves the service as well as the maximum number of users allowed in this type of communication.

The main objective of this project is to get to know the behaviour of MU-MIMO technology (Multi-User Multiple-Input Multiple-Output) when the number of users in the system is increasing.

Firstly, there will be shown a study according to the evolution of MU-MIMO, presenting the necessities that boosted the technology MIMO and furthermore the sub-technologies of MIMO: SU-MIMO (Single-User Multiple-Input Multiple-Output), SISO (Single-Input Single-Output), MISO (Multiple-Input Single-Output) and SIMO (Single-Input Multiple-Output).

Secondly, a study related to how SU-MIMO works will be presented. Moreover there will be displayed the differences between SU-MIMO and MU-MIMO and how MU-MIMO improves the efficiency of the system. In addition, a mathematical demonstration of MIMO channel will be studied as well as MIMO subcategories.

Finally, it will be shown different simulations. These simulations are based on an uplink communication in which the number of users transmitting is variable. The total number of vertical antennas per user is 10 meanwhile the base station has 100 antennas receiving.

The aim of these simulations is to get familiar to the performance of MU-MIMO according to two main variables: the angular dispersion of the receiver and capacity channel.

The main objective of these simulations is to observe how the angular dispersion of the receiver changes from a Gaussian distribution to a uniform distribution when the number of users increases. Also, it is shown how the capacity changes according to the number of users in the system.



Universidad
Carlos III de Madrid



Agradecimientos

Finalizar el grado y presentar el Trabajo Fin de Grado significa el fin de una etapa de mi vida que ha durado 4 años y en la que ha habido todo tipo de sensaciones.

Al comenzar, las primeras semanas del primer curso, llegó la primera sensación de que, aunque me esforzara al máximo, nunca podría terminar el grado. Esta sensación no ha desaparecido en estos 4 años, ha ido yendo y viniendo, pero siempre estaba presente. Gracias a no darme por vencida y seguir esforzándome hoy por fin esa sensación desaparece para siempre.

Sin embargo, el hecho de seguir hacia delante con ánimos ha sido gracias a la gente que tengo a mi alrededor y que no han dejado nunca que me desanime y tire la toalla, porque creían en mí. Y de lo que más orgullosa me siento en este momento es de no haberlos decepcionado.

En primer lugar, y bien merecido, gracias a mi familia por ese apoyo incondicional y esa fe ciega en mí. En especial y por ser los que habéis vivido todas las desilusiones y decepciones conmigo, a mis padres. Sin vosotros no hubiera conseguido nada de lo que he conseguido hasta ahora.

Tampoco me puedo olvidar de ti abuela, gracias por todo el apoyo durante estos años.

Por otra parte, gracias a ti Alejandro, que prácticamente ya eres de la familia. Gracias por aguantar mis lloros y mis fracasos y no haber permitido que abandonara. Gracias por apoyarme y estar siempre ahí, tanto en los buenos momentos como en los peores. Como solemos decir, media carrera es mérito tuyo.

También dar las gracias a mis compañeros, tanto a los que han ido avanzando conmigo como a los que abandonaron o se quedaron atrás, pero terminarán pronto también. En este tipo de carreras, es necesario ayudarnos unos a otros para poder llegar al final y gracias también a este apoyo en este momento puedo terminar mi grado.

Por último, agradecer a mi profesora y tutora del proyecto su atención y enseñanza. Gracias a los conocimientos que me ha brindado, en primer lugar como profesora, y posteriormente como tutora del trabajo fin de grado. Gracias Matilde no solo por los conocimientos, también por tu trato.

Gracias a toda la gente que me ha apoyado a lo largo de esta dura etapa.



Universidad
Carlos III de Madrid



Índice

Resumen	1
Abstract.....	3
Agradecimientos	5
Índice	7
Tabla de Ilustraciones.....	9
Introduction	11
1. <i>State of the art.....</i>	13
2. <i>Motivation and objectives.</i>	16
MIMO	17
2.1 <i>Beneficios.....</i>	19
2.2 <i>Tipos de sistema MIMO.....</i>	20
MIMO Multiusuario	23
3.1 <i>Canales MIMO multiusuario.</i>	24
3.1.1 MIMO BC (MIMO Broadcast)	24
3.1.2 MIMO MAC (MIMO Multiple Access Channel).....	24
3.2 <i>Dualidad BC-MAC.....</i>	26
Canal MIMO.....	29
4.1 <i>Matriz H del canal MIMO.....</i>	31
4.2 <i>Capacidad MU-MIMO.....</i>	33
4.2.1 <i>Región capacidad MAC.....</i>	34
4.2.2 <i>Capacidad BC</i>	35
Resultados	37
5.1 <i>Distribución de los transmisores y receptores.</i>	38
5.2 <i>Simulaciones.</i>	42
5.2.1 <i>Dispersión Laplaciana vista por BTS.....</i>	42
5.2.2 <i>Capacidad.</i>	52
Conclusions and future works.....	57
APPENDIX.....	59
A. Entorno socio-económico, presupuesto y plan de trabajo.....	61
1. Entorno socio-económico	61
2. Presupuesto	62
3. Plan de trabajo	63
B. PROJECT EXTENDED ABSTRACT	65
1. Introduction.....	65
2. MIMO.....	66
3. Chanel MIMO	68
4. Results	70
5. Conclusions and future works.....	77
Referencias.....	79



Universidad
Carlos III de Madrid

Tabla de Ilustraciones

Figure 1.1 Schematic of a MIMO communication system.	11
Figure 1.2. Number of antennas of a SISO communication system.	13
Figure 1.3. Number of antennas of a MISO communication system.	13
Figure 1.4. Number of antennas of a SIMO communication system.	14
Figure 1.5. Number of antennas of a MIMO communication system.	14
Figura 2.1.Capacidad MIMO frente capacidad SISO/MISO.	18
Figura 2.2.Transmisión SU-MIMO.....	21
Figura 2.3.Transmisión MU-MIMO	21
Figura 3.1. Dualidad BC-MAC.....	26
Figura 3.2.Diagrama funcionamiento MU-MIMO punto a multipunto.....	27
Figura 4.1.Diagrama funcionamiento MU-MIMO punto a multipunto.....	29
Figura 5.1 Distribución de las antenas de la estación base	38
Figura 5.2. Distribución de las antenas de los usuarios.	39
Figura 5.3. Colocación 10 usuarios frente a la BTS (plano horizontal).....	40
Figura 5.5. Dispersión angular con 2 usuarios, 180°	43
Figura 5.6. Dispersión angular con 3 usuarios, 180°	44
Figura 5.7. Dispersión angular con 15 usuarios, 180°	45
Figura 5.8. Dispersión angular con 2 usuarios, 30° , 2D	46
Figura 5.9. Dispersión angular con 2 usuarios, 30° , 3D	47
Figura 5.10. Dispersión angular con 5 usuarios, 30° , 2D	48
Figura 5.11. Dispersión angular con 5 usuarios, 30° , 3D	49
Figura 5.12. Dispersión angular con 25 usuarios, 30° , 2D	50
Figura 5.13. Dispersión angular con 25 usuarios, 30° , 3D	51
Figura 5.15. Capacidad 2, 5, y 10 usuarios, 180°	53
Figura 5.16. Capacidad $K=2$, $M=2$, 5 y 10 ASA = 30°	54
Figura 5.17. Capacidad $K=5$, $M=2$, 5 y 10 ASA = 30°	55
Figura 5.18. Capacidad $K=10$, $M=2$, 5 y 10 ASA = 30°	55
Figure B.1. SU-MIMO transmission.....	67
Figure B.2. MU-MIMO transmission.	67
Figure B.3. Schematic MIMO channel.....	68
Figure B.4 Base station antennas distribution.	71
Figure B.5 Users antennas distribution	72
Figure B.6 Angular dispersion, 2 user, 180°	73
Figure B.7 Angular dispersion, 15 user, 180°	74
Figure B.8 Angular dispersion, 2 user, 30°	75
Figure B.9 Angular dispersion, 25 user, 30°	76
Figure B.10 Capacity	77



Universidad
Carlos III de Madrid

Chapter 1

Introduction

Nowadays we cannot imagine a world without wireless communications because they are part of our daily life and we couldn't conceive a day without Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee NFC (Near Field Communications), etc. The use of these technologies and the continuous demand of the users in order to have better service drive to the development and the study of new ways of communication to improve their efficiency.

As mentioned before, the demand of higher transmission rates has increased in the past few years and it is necessary to improve the wireless communication field because of their limitations according to the usable bandwidth. MIMO technology solve the different problems of the previous technologies offering what is mentioned bellow

- Higher transmission rates
- Higher area coverage
- Higher user capacity
- More reliability

The most important characteristic of MIMO is that all the improvements mentioned above are made without the increase of the bandwidth. In order to get those objectives [1], antenna arrays are used in both transmission and reception and the same time as shown below.

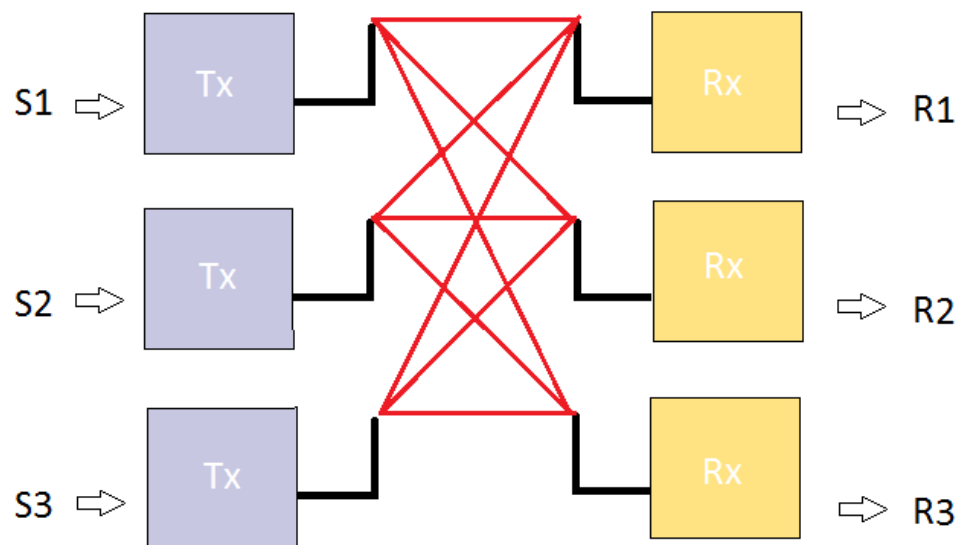


Figure 1.1 Schematic of a MIMO communication system.



In this chapter MIMO technology is studied. Also, its history and the benefits that it provides is studied.

Then, the motivation and objectives of the project will be discussed.

1. State of the art

As commented before, new wireless technologies are booming because they suffer a great demand since their daily use.

MIMO technology is considered in wireless communication systems as an opportunity to improve the throughput in comparison to a single antenna system. This is because the transmission and reception are performed with multiple antennas and this provides greater transmission capacity to the system, which is obtained by obtaining rates of transmission higher.

One of the most important concepts to understand MIMO and its progress is the diversity of the channel. Diversity could be explained as the sending of multiple copies of the same signal through different paths, this is possible by using multiple antennas in the transmission and/or reception [2].

Depending on the number of antennas that are transmitting and receiving, thus there are the following MIMO technology predecessors systems:

- SISO (Single-Input, Single-Output). System with a single antenna in transmission and reception.



Figure 1.2. Number of antennas of a SISO communication system.

- MISO (Multiple-Input, Single-Output). System with multiple antennas in transmission and a single antenna at the reception.



Figure 1.3. Number of antennas of a MISO communication system.

- SISO (Single-Input, Single-Output). System with a single antenna at the transmission and a single antenna at the reception.



Figure 1.4. Number of antennas of a SISO communication system.

- MISO (Multiple-Input, Single-Output). System with multiple antennas at the transmission and a single antenna at the reception.



Figure 1.5. Number of antennas of a MISO communication system.

The first ideas about MIMO appear at the beginning of the 70s with the first investigations by A.R. Kaye, George D.A. and W. Van Etten [3][4]. Between 1984 and 1986 numerous articles on the “beamforming” or forming antenna beams were published by Bell Labs, with Jack Winters and Jack Salz [5] [6].

In 1994, Stanford University (California) patented the “Spatial Multiplexing” [7], but it is in 1998 when is created the first prototype of spatial multiplexing by Bell Labs. This prototype is the key technique to the development of a communication MIMO system [8].

MIMO is a technology which involves the use of multiple signals that travel simultaneously in the same frequency channel and uses the multipath propagation to increase the efficiency of a wireless communications system.

MIMO differs from conventional systems. While conventional systems attempt to eliminate multipath propagation, MIMO uses the energy in the multipath signals. Another feature that differentiates these two types of systems is that a conventional system represents one-dimensional systems, while MIMO represents a multidimensional system, ie, a MIMO system sends multiple data signals at the same time and by the same radio channel as already mentioned above[9].



This previewed approach results in SU-MIMO (Single User MIMO) (802.11n wireless standard, 2007). Although a communication system is improved in many ways by SU-MIMO it also presents an obvious downside. This downside of Single User is that the multiple streams of data must be sent or received just by one device at the same time. Another disadvantage is that SU-MIMO requires multiples antennas that add cost, weight and size [10].

MU-MIMO (Multi User MIMO) (802.11ac wireless standard) enhances the MIMO technology by enabling the simultaneously transmission of those multiple streams to different devices, in other words, an access point is capable of sending several data streams simultaneously [10].

One of the benefits of MU-MIMO is that those multiple streams data can be sent/received to/by different devices, increasing the possible throughput of the network. Furthermore, the transmitter is the device that does the heavy processing of the signals, thus it's less taxing on the receiver.

Multi User MIMO increases the speeds and throughput of the communications system in comparison to SU-MIMO. It also increases the capacity of the communications system.

2. Motivation and objectives.

The main motivation of this project is to try to maximize the capacity in the uplink MIMO channel, or in other words, the communication between multiple users with the base station for a MIMO multiuser system. This is done by means of studying how different distributions of users affect the channel matrix characteristics and therefore the channel capacity.

To achieve the proposed objective of improving system capacity, it will be carried out the development, implementation and analysis of different transmission models. The number of users will be increased and the environmental Laplacian dispersions will be modified for each user, as a result, the base station will see an uniform joint distribution, that they will be the sum of all Laplacian distributions of each user. All this will be done with the aim to analyze the results and make a subsequent comparison of these results, as well as the benefits that they achieve according to the capacity.

Therefore, the objectives of this final project are:

- Study the state of art of MIMO systems. First, we have been studying the MIMO technology predecessors systems like SISO, MISO and SIMO. Secondly, we have been studying MIMO technology, its subcategories SU-MIMO or point to point and MU-MIMO or point to multipoint and its benefits.
- Review the different alternatives algorithmic proposed for multiuser MIMO systems.
- Develop and implement a MIMO channel model with different user distributions. We have been investigating how angular dispersions changes when the number of users increases, and how it affects the system capacity.

All the objectives explained above are made in order to analyze the results and make a subsequent comparison of these results. Finally, the conclusions reached after making the necessary simulations are presented in order to analyze the results and compare them under all conditions considered.

Capítulo 2

MIMO

En este capítulo se va a incidir sobre cómo funciona la tecnología MIMO y los beneficios que aporta su empleo.

Como ya se ha comentado previamente, la tecnología MIMO consiste en la utilización de múltiples antenas tanto en la transmisión como en la recepción para comunicaciones inalámbricas mediante enlaces radio.

Estos enlaces inalámbricos se ven afectados por los efectos multitrayecto que los sistemas MIMO consiguen afrontar. MIMO introduce mejoras en cuanto a la dimensión frecuencial y temporal. Gracias a esto MIMO consigue aumentar la eficiencia espectral de un sistema de comunicación inalámbrica.

Lo que distingue a un sistema MIMO es que en vez de tratar el efecto multitrayecto como un problema saca ventaja de ello de manera que, cada ruta multicamino será tratada como un canal diferente. Al emplear múltiples antenas separadas espacialmente se aprovecharán estas distintas rutas para transmitir más datos para así de esta manera poder multiplicar la tasa. La tasa máxima por canal crecerá linealmente con el número de subflujos de datos diferentes que son transmitidos en el mismo canal [9] [11].

También se incrementa el área de cobertura debido a la diversidad de antenas.

Al haber múltiples antenas en la transmisión, los datos se subdividen en pequeños paquetes. Cada antena transmisora envía uno de esos paquetes. Las antenas del extremo receptor recibirán una combinación de los múltiples subflujos transmitidos. Para obtener la señal original se separarán ordenarán y combinarán los subflujos.

La capacidad para un sistema MIMO con un único usuario se incrementa de manera lineal mediante la fórmula:

$$C_{MIMO} = M f_g \log_2 (\det | \mathbf{I} + SNR \mathbf{H} \mathbf{H}^H |) \quad (2.1)$$

Donde M es el número de antenas transmisoras, f_g es el ancho de banda, H es la matriz que representa la dispersión del canal y SNR es la relación señal a ruido del sistema.

Mientras que la capacidad de los sistemas anteriores, como los sistemas SISO se incrementan de manera logarítmica con la siguiente fórmula:

$$C_{SISO} = f_g \log_2 (1 + SNR) \quad (2.2)$$

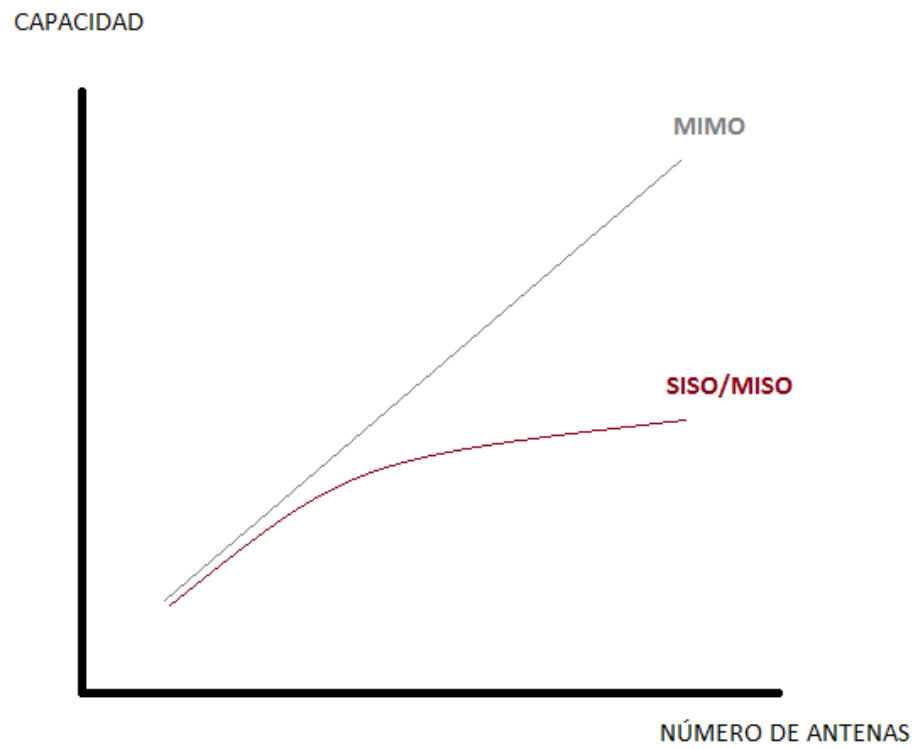


Figura 2.1. Capacidad MIMO frente capacidad SISO/MISO.

2.1 Beneficios

Los beneficios que obtiene cualquier sistema al implementar la tecnología MIMO son bastantes.

Debido al incremento lineal de la eficiencia espectral frente al incremento logarítmico de otros sistemas de una sola antena, a parte de la calidad también mejora [12]:

- *Área de cobertura.* Se alcanzan distancias mayores sin aumentar la potencia de transmisión gracias a las técnicas de diversidad.
- *BER* (Bit Error Ratio o probabilidad de error). Por lo tanto aumenta la fiabilidad.
- *Tasa de bits.* Permite la transmisión simultánea de múltiples tramas de datos y sin consumir más espectro.
- *Número de usuarios.* Debido al incremento de la capacidad del sistema se permite ampliar el número de usuarios que podrían compartir información en un mismo canal de frecuencia.
- *Coste.* Consigue disminuir el coste debido a que con la misma potencia se puede mejorar su alcance y abastece a más usuarios desde un único punto de acceso.

2.2 Tipos de sistema MIMO.

Los sistemas MIMO pueden ser de dos tipos:

- SU-MIMO (Single-User MIMO)
- MU-MIMO (Multi-User MIMO)

SU-MIMO es la tecnología MIMO aplicada a un único usuario también llamada punto a punto. Las características que hemos visto hasta ahora se corresponden con este tipo de sistema MIMO.

Las principales técnicas utilizadas en SU-MIMO son: *BLAST* (Bell Laboratories Architecture Layered Space-Time), *PARC* (Per Antenna Rate Control) y *SPARC* (Selective Per Antenna Rate Control).

Aunque SU-MIMO, mediante la multiplexación espacial, consigue una gran mejora en la eficiencia espectral, coste, probabilidad de error, capacidad del canal, etc. No aprovecha la diversidad de usuarios.

En un sistema SU-MIMO se establece una comunicación entre una única estación base y un único usuario. Este tipo de sistema requiere una carga de computación más simple que un sistema MU-MIMO pero sin duda obtenemos una mejora de la eficiencia espectral aún mayor cuando trabajamos con MU-MIMO.

MU-MIMO es una mejora de la tecnología MIMO que permite a múltiples usuarios comunicarse con una misma estación base mejorando aún más la capacidad de comunicación de cada usuario individual. Esta tecnología se considera un MIMO avanzado porque además de aprovechar el uso de varias antenas transmitiendo y recibiendo, también aprovecha la multiplicidad de usuarios.

MU-MIMO también se subdivide de la siguiente manera:

- Punto a multipunto. Que a su vez puede ser:
 - MIMO Broadcast Channels o MIMO BC.
 - MIMO Multiple Access Channels o MIMO MAC.
- Multipunto a multipunto.
 - Cooperative MIMO o CO-MIMO también conocido como Network MIMO o Ad Hoc MIMO.

Podemos observar en las siguientes figuras que la manera de transmitir los flujos de datos con SU-MIMO y con MU-MIMO es diferente:

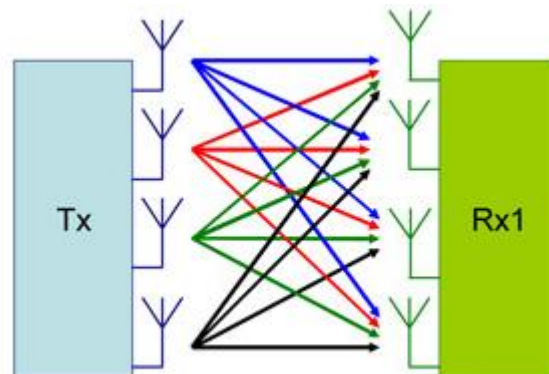


Figura 2.2.Transmisión SU-MIMO

En el sistema SU-MIMO, con un transmisor y un receptor, podemos observar que para cada antena transmisora se precisan 4 flujos de información, uno para cada antena receptora.

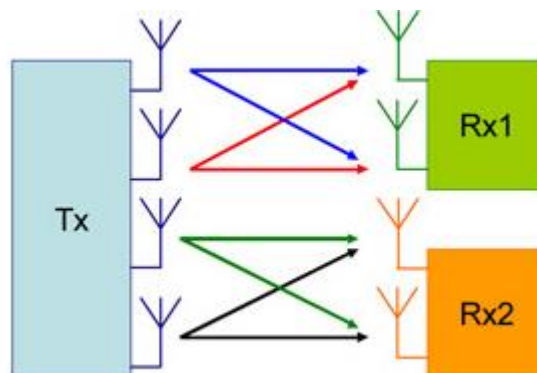


Figura 2.3.Transmisión MU-MIMO

Por otra parte, en un sistema MU-MIMO, observamos que se reduce el número de flujos. En este caso tenemos dos flujos por cada antena transmisora, uno por cada usuario.

En el próximo capítulo se estudiará cómo MU-MIMO permite la mejora del canal MIMO, cómo consigue la mejora de capacidad del canal y se explicará de forma más extendida los tipos de MU-MIMO comentados previamente, y se explicarán también los canales con los que trabaja en cada caso.



Universidad
Carlos III de Madrid

Capítulo 3

MIMO Multiusuario

Como ya se ha comentado previamente, estos tipos de sistemas se caracterizan por tener múltiples antenas transmisoras y receptoras que no solamente permiten la comunicación con un único usuario si no que aprovechan el efecto multicamino para permitir la comunicación con multitud de usuarios.

Para realizar esta comunicación es necesario transmitir tantas ráfagas de información como usuarios tenga el sistema, como se ha comentado previamente.

La aparición de esta nueva tecnología abre caminos nuevos en los que poder mejorar SU-MIMO, apareciendo nuevas técnicas como SDMA (Space-Division Multiple Access). SDMA, al igual que la multiplexación espacial permite la transmisión paralela simultánea y en la misma banda de frecuencia, pero para múltiples usuarios y ofreciendo un rendimiento superior.

En los sistemas SU-mimo para conseguir un incremento lineal como se ha visto antes es necesario un número elevado de antenas para la transmisión y para la recepción. Pero en los sistemas MU-MIMO solo es necesario establecer un número elevado de antenas en los punto de transmisión. Además de que a mayor número de usuarios mayor mejora de la capacidad.

En la categoría MU-MIMO multipunto a multipunto existe la subcategoría CO-MIMO/ Network MIMO / Ad Hoc MIMO. Este caso se da en situaciones en la que varios usuarios transmiten información a otros usuarios y viceversa. En este caso, con las comunicaciones inalámbricas cooperativas cada nodo aprovecha todas las interferencias del sistema, al contrario que los sistemas convencionales que buscan evitarla. Para mejorar el rendimiento red se utiliza la interferencia propia y la del resto de nodos del sistema, de esta manera se mejora la codificación y decodificación de la información.

En cuanto a MIMO punto a multipunto funciona mediante la utilización de los canales comentados previamente (BC y MAC) que se explican a continuación.

3.1 Canales MIMO multiusuario.

3.1.1 MIMO BC (MIMO Broadcast)

Representa el canal del enlace descendente, es decir, el enlace estación base a usuarios. Este es el canal en el que la estación base transmite informaciones independientes a distintas tasas de transmisión. Cada uno de los usuarios recibe, decodifica y procesa la información recibida.

En este canal únicamente hay un punto de transmisión.

Debido a que la señal se recibe de manera independiente por cada usuario, la decodificación en este tipo de canales es muy importante por lo que los terminales de los usuarios tienden a tener una cierta complejidad.

En este caso, el máximo de la capacidad del canal se obtiene cuando el número de antenas del transmisor es elevado con respecto al número de antenas receptoras de cada receptor.

En este canal, a cada señal de información transmitida se le asocia una componente de ruido.

Por otro lado, en el canal BC tiene una potencia de transmisión fija.

3.1.2 MIMO MAC (MIMO Multiple Access Channel)

Representa el canal del enlace ascendente, es decir, el enlace usuarios a estación base. En este caso los usuarios transmiten la información de manera simultánea hacia un mismo receptor (estación base) con un número de antenas más elevado que el de usuarios.

En este caso, el procesamiento se realiza en el receptor.

El máximo de la capacidad para este canal se obtiene cuando el número de antenas en el receptores más elevado que el número de antenas de cada transmisor o usuario.

En este caso, cada transmisor o usuario tiene un límite de tasa de transmisión o lo que es lo mismo, no pueden transmitir con una potencia mayor a un límite establecido, a diferencia del canal BC. Esto quiere decir que si únicamente transmite un usuario se desperdicia capacidad del sistema ya que la potencia de transmisión se multiplica por cada usuario que transmita. Hay una potencia asociada a cada una de las señales transmitidas o lo que es lo mismo, a cada transmisor.

La ventaja de este canal con respecto al canal BC es que debido a que únicamente hay un receptor sólo se añade una componente de ruido.



Para no desperdiciar recursos y obtener el máximo de capacidad para este canal se consigue al repartir la potencia de transmisión.

Cabe destacar que este canal será el canal de MIMO multiusuario estudiado en las simulaciones que se realizarán posteriormente.

3.2 Dualidad BC-MAC

Para que los canales BC y MAC se puedan considerar duales deben:

- Tener una ganancia de canal igual para ambos sentidos.
- Cada canal BC deben tener los mismos estadísticos de ruido que el resto y ser iguales que sus correspondientes en el modelo MAC.
- La suma de las potencias individuales de las señales del canal MAC debe ser equivalente a la potencia en el canal BC.

Según [8], la región de capacidad del modelo BC se obtiene como unión de las regiones de capacidad del modelo MAC asociadas a las potencias individuales cuya suma da como resultado la potencia asociada al modelo BC.

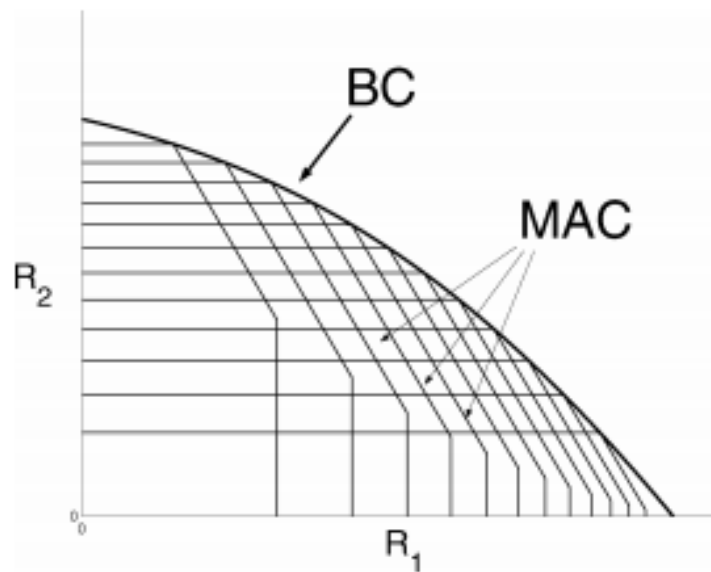


Figura 3.1. Dualidad BC-MAC.

En la siguiente figura se busca demostrar el funcionamiento de MU-MIMO de punto a multipunto.

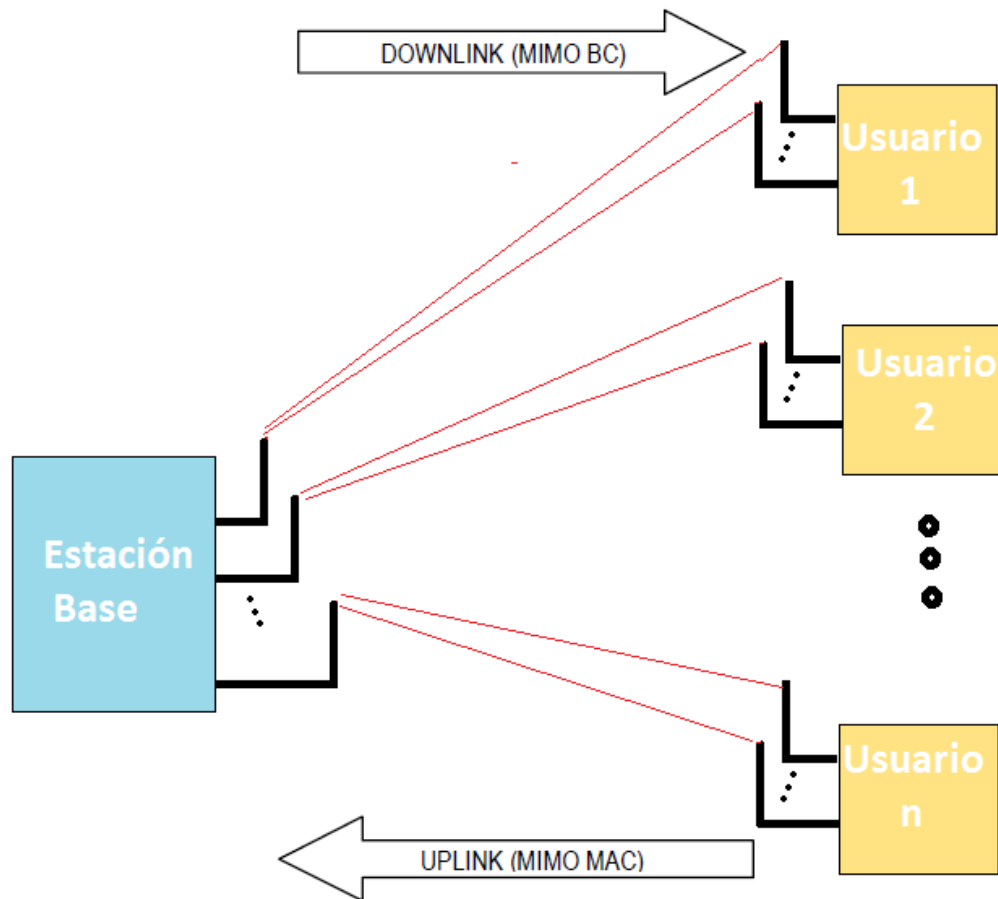


Figura 3.2. Diagrama funcionamiento MU-MIMO punto a multipunto.



Universidad
Carlos III de Madrid

Capítulo 4

Canal MIMO

En las comunicaciones mediante la tecnología MIMO, debido a que todos los flujos de información se transmiten a la misma frecuencia y a que hay un gran número de enlaces (debido al elevado número de antenas transmisoras y receptoras del sistema), es necesario para cada usuario obtener cada flujo de información independiente y procesarlo.

En cuanto al modelo SU-MIMO en su canal de banda estrecha, observamos el modelo matemático en la siguiente figura:

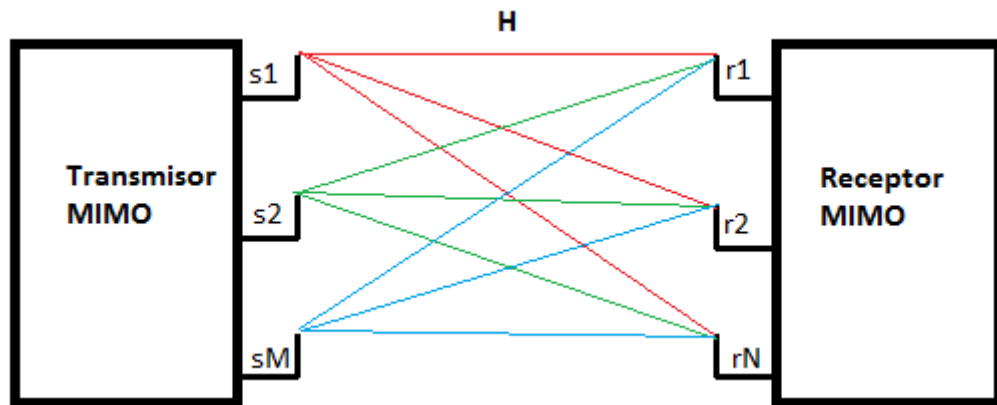


Figura 4.1. Diagrama funcionamiento MU-MIMO punto a multipunto.

Donde M es el número de antenas transmisoras y N el número de antenas receptoras.

De la anterior figura obtenemos la siguiente relación de entrada y salida:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (4.1)$$

Donde:

\mathbf{r} : vector de datos recibidos (dimensión $N \times 1$).

\mathbf{s} : vector de datos transmitidos (dimensión $M \times 1$).

\mathbf{n} : vector de ruido aditivo (dimensión $N \times 1$).

\mathbf{H} : matriz de canal MIMO (dimensión $N \times M$).

Por lo que nos queda algo de la forma:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ \dots \\ r_j \\ \dots \\ r_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1i} & \dots & h_{1,M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{j1} & & h_{ji} & & h_{j,M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N,1} & \dots & h_{N,i} & \dots & h_{N,M} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1 \\ \dots \\ s_i \\ \dots \\ s_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \dots \\ n_j \\ \dots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

La ecuación que define el sistema MIMO multiusuario para un usuario es exactamente la misma, pero tienen distintos significados.

4.1 Matriz H del canal MIMO.

La matriz H del canal MIMO representa la dispersión del canal cuando transmite la antena transmisora i -ésima, y recibe la antena receptora j -ésima. Se calcula de la siguiente manera [16][17]:

$$H = B_N^* S B_M \quad (4.3)$$

O lo que es lo mismo:

$$H = \begin{bmatrix} e^{jk'_1 r'_1} & e^{jk'_2 r'_1} & \dots & e^{jk'_L r'_1} \\ e^{jk'_1 r'_2} & e^{jk'_2 r'_2} & \dots & e^{jk'_L r'_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{jk'_1 r'_N} & e^{jk'_2 r'_N} & \dots & e^{jk'_L r'_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S(k'_1, k_1) & S(k'_1, k_2) & \dots & S(k'_1, k_L) \\ S(k'_2, k_1) & S(k'_2, k_2) & \dots & S(k'_2, k_L) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S(k'_L, k_1) & S(k'_L, k_2) & \dots & S(k'_L, k_L) \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} e^{-jk_1 r_1} & e^{-jk_2 r_1} & \dots & e^{-jk_L r_1} \\ e^{-jk_1 r_2} & e^{-jk_2 r_2} & \dots & e^{-jk_L r_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-jk_1 r_N} & e^{-jk_2 r_N} & \dots & e^{-jk_L r_N} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Las matrices B_N y B_M describen la posición espacial de las antenas receptoras y transmisoras respectivamente mediante $\langle r'_1, r'_2, \dots, r'_N \rangle$ y $\langle r_1, r_2, \dots, r_M \rangle$.

La dirección de las ondas planas del receptor y del transmisor son expresadas mediante $\langle k'_1, k'_2, \dots, k'_L \rangle$ y $\langle k_1, k_2, \dots, k_L \rangle$ respectivamente.

La matriz S describe la dispersión existente en el canal.

La matriz de canal simplificada, asumiendo que el canal es Gaussiano y las dispersiones son independientes entre ellas sería la siguiente:

$$H = B_N^* \Sigma_R^{\frac{1}{2}} G \Sigma_T^{\frac{1}{2}} B_M \quad (4.6)$$

La matriz G está formada por variables aleatorias Gaussianas complejas e independientes.

Las matrices $\Sigma_R^{\frac{1}{2}}$ y $\Sigma_T^{\frac{1}{2}}$ son diagonales y en esta tienen el PAS (Power Angular Spread). En el receptor se modelan según una función Laplaciana teniendo en cuenta el ángulo que forma cada antena transmisora con el usuario correspondiente θ , el ángulo de dispersión de las antenas transmisoras (ASD) y las receptoras (ASA). Por otra parte, en el caso del transmisor se corresponde con la dispersión vista por los usuarios y es modelada según una función uniforme.



Los valores de la matriz de canal H son las ganancias del canal para los enlaces entre las antenas transmisoras y las receptoras i .

Debido a esto, la colocación de las antenas transmisoras y su condicionamiento es muy importante para poder separar cada flujo de dato recibido y poder independizar un usuario de los demás.

Es por esto por lo que la ecuación para un sistema multiusuario MIMO coincide con la ecuación de canal de un sistema de un único usuario, pero la visión y el significado de esta es distinta.

4.2 Capacidad MU-MIMO.

La capacidad del canal (por el teorema de Shannon en 4.7) se define como la tasa de transmisión máxima que puede soportar el canal con una transmisión sin errores o en otras palabras, una medida de cuanta información es posible transmitir con una probabilidad de error nula [13].

Utilizando la misma nomenclatura, es decir, un sistema con un numero de antenas transmisoras M , un numero de antenas receptoras N y un número de usuarios K .

La matriz \mathbf{H} que caracteriza el canal vista previamente corresponde al canal de bajada, que en el caso multiusuario se corresponde con el canal BC, por otra parte, la matriz \mathbf{H}^H se corresponde con el canal ascendente que en el caso multiusuario se corresponde con el canal MAC.

En los sistemas Single User MIMO, la capacidad del sistema es un escalar, es decir, es invariante con el tiempo y para un único usuario. Esta capacidad viene dada por:

$$C = \log_2 \left\{ \det \left(\mathbf{I} + \frac{SNR}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\} \quad (4.7)$$

Donde SNR es la relación señal a ruido media de la señal recibida en cada una de las antenas del receptor

Sin embargo, en los sistema MIMO multiusuario, los límites de la capacidad vienen definidos por una región de K -dimensiones, donde cada punto representa un vector formado por el conjunto de tasas de transmisión que alcanzan los K usuarios simultáneamente [16][17].

Una zona importante de la región de la capacidad son los llamados *sum-rate points* que se representan cuando es máximo el *sum-rate* o la suma de las tasas de transmisión de datos entre la estación base y los usuarios.

4.2.1 Región capacidad MAC

En el canal MAC, la señal recibida \mathbf{r} (dimensión $M \times 1$) queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{r} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k^H \mathbf{s}_k + \mathbf{n} \quad (4.8)$$

Donde \mathbf{H}_k es la matriz del canal de transmisiones de dimensión $N \times M$ y \mathbf{n} es el ruido aditivo Gaussiano en el transmisor con componentes i.i.d variables complejas Gaussianas, circularmente simétricas de media nula y varianza unidad. Se asume que el usuario conoce perfectamente la matriz \mathbf{H}_k .

\mathbf{s}_k es la señal transmitida por el usuario k -ésimo y es una combinación de todas las señales transmitidas por cada usuario k como se ve a continuación:

$$\mathbf{s} = \sum_{k=1}^K \mathbf{s}_k \quad (4.9)$$

En el canal MAC, cada usuario tiene una restricción de potencia \mathbf{P}_k . La matriz de correlación de cada usuario, $\mathbf{Q}_k = E[\mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H]$, define la restricción de potencia. $\text{Tr}[\mathbf{Q}_k] \leq P_k \quad \forall k$

Suponiendo que el usuario k -ésimo transmite una señal Gaussiana con media nula y matriz de correlación \mathbf{Q}_k , para un conjunto de potencias en el enlace ascendente $\mathbf{P} = (P_1, \dots, P_K)$, cada conjunto de matrices $(\mathbf{Q}_1, \dots, \mathbf{Q}_K)$, define una región de K dimensiones.

La región de capacidad para un canal MAC es conocida tanto para un canal constante como para un canal con desvanecimientos. Esta región es la unión de todas las matrices que cumplen la restricción de potencia.

$$C_{MAC} = \sum_{k=1}^K R_k \leq \log_2 \{ \det(\mathbf{I} + \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_k^H \mathbf{Q}_k \mathbf{H}_k) \} \quad (4.10)$$

4.2.2 Capacidad BC

En el canal MAC, el vector de la señal recibida por el usuario k -ésimo, con dimensión $N \times 1$, queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n}_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (4.11)$$

Donde \mathbf{H}_k es la matriz del canal de dimensión $N \times M$, \mathbf{s} es la señal transmitida por la estación base de dimensión $M \times 1$, y \mathbf{n}_k es el ruido aditivo Gaussiano que se añade al usuario k -ésimo receptor de la información.

La potencia con la que se transmite a cada usuario viene dada por la distribución uniforme de una potencia máxima que restringe la potencia de transmisión.

La región de capacidad del canal BC se obtiene en la práctica mediante simulaciones de Monte-Carlo y estudiando cómo varía en función de distintos parámetros del sistema como el número de usuarios, el número de antenas transmisoras y receptoras o la potencia máxima de transmisión.



Universidad
Carlos III de Madrid

Capítulo 5

Resultados

Una vez estudiado las prestaciones de un sistema de comunicaciones MIMO y el modelo de canal con el que se va a trabajar, en este capítulo se observarán los resultados obtenidos mediante las simulaciones de distintos escenarios.

El capítulo de resultados se estructurará de manera que, primero se observará la dispersión angular ASA observada por la estación base y se observará los cambios que sufre esa dispersión según se va incrementando el número de usuarios que envían información a la estación base, hasta parecerse a la situación que buscamos que es una dispersión uniforme de 180° .

A continuación se realizará lo mismo pero con una dispersión angular para la BTS en una situación real. Dado que la dispersión angular en la realidad toma valores entre 30 y 50 grados aproximadamente, las pruebas se realizarán con un valor de ASA de 30 grados, y se observará cómo se comporta la dispersión observada por la estación base según se van incrementando el número de usuarios.

Por otra parte, se observarán las prestaciones del sistema en cuanto a la capacidad del canal. Se comparará el comportamiento de la capacidad según se va incrementando el número de usuarios y la dispersión percibida por la estación base se va transformando en una uniforme.

5.1 Distribución de los transmisores y receptores.

Las siguientes simulaciones se realizarán en el enlace ascendente o canal MAC, la estación base recibirá la información con 100 antenas distribuidas de la siguiente manera en los ejes X e Y:

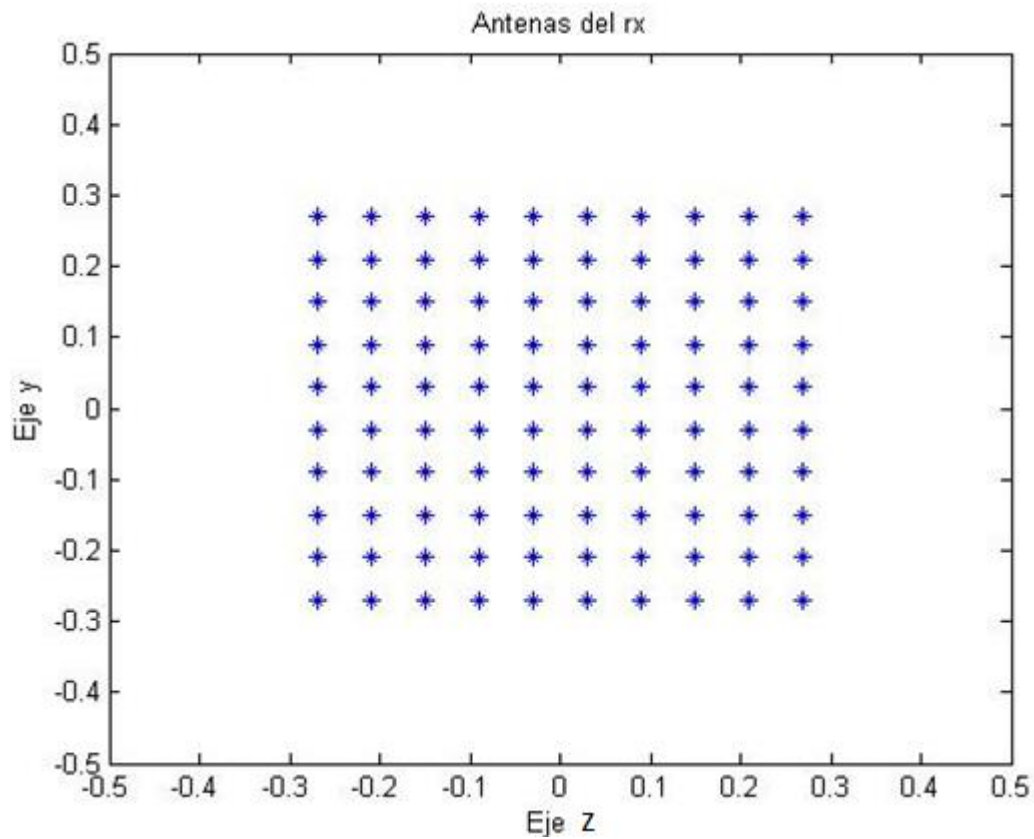


Figura 5.1 Distribución de las antenas de la estación base.

Por otra parte los usuarios transmitirán con 10 antenas distribuidas de la siguiente manera:

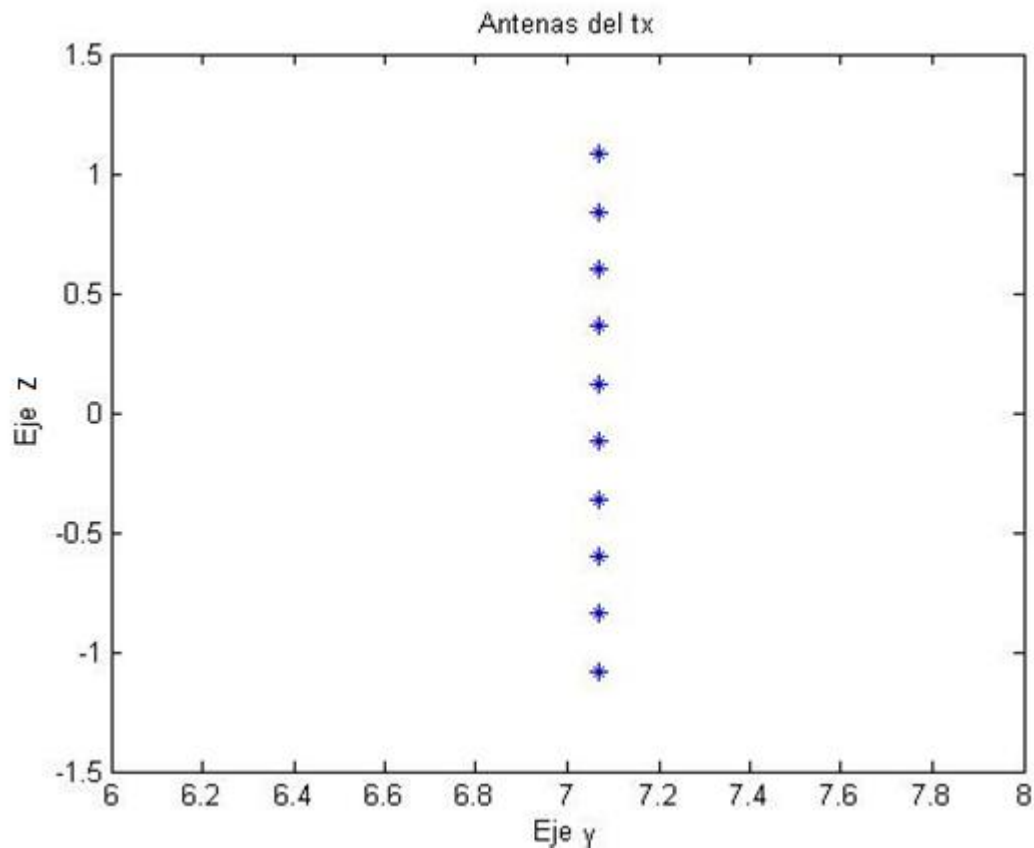


Figura 5.2. Distribución de las antenas de los usuarios.

En las simulaciones se utiliza una frecuencia de trabajo de 2.5 GHz. Las antenas del receptor, es decir, de la estación base se encuentran separadas unas de otras en $\frac{\lambda}{2}$, mientras que las antenas del transmisor, es decir, de los usuarios estarán separadas unas de otras en 2λ .

Todos los usuarios se encuentran en un mismo plano (ángulo $\theta = \frac{\pi}{2}$). Se distribuirán de manera que bordearan la BTS y equiespaciados entre sí. Es posible modificar el ángulo en el que se encontrarán los usuarios, es decir, en qué ángulo se encuentran situados todos los usuarios rodeándola la BTS.

Se puede observar la colocación de 10 usuarios frente a la BTS, colocados a una cierta distancia en un ángulo de 180 grados en la siguiente figura, en la que se observa que los puntos azules simbolizan las antenas de la BTS y los rojos las antenas de los usuarios.

Por otra parte explicar que en la siguiente figura (figura 5.3) se observa en los ejes x y z (plano horizontal), por lo que se podría decir que es la planta (figura vista desde arriba), para poder observarlo con claridad.

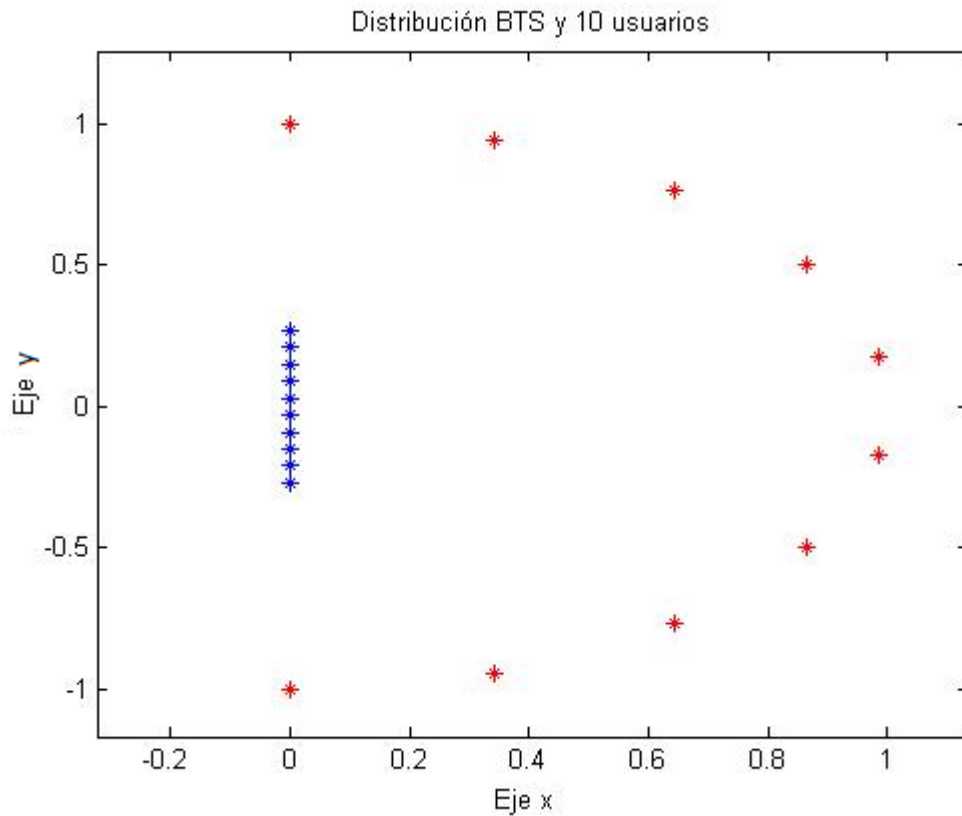


Figura 5.3. Colocación 10 usuarios frente a la BTS (plano horizontal).

En el escenario de las simulaciones, se supondrá que los usuarios se encontrarán distribuidos uniformemente entre 45° y -45° , en vez de en 90° y -90° . Esto será debido a que se supone que los usuarios se encontrarán lejos a la estación base.

Por tanto tendremos una distribución de usuarios frente a la estación base de la siguiente manera:

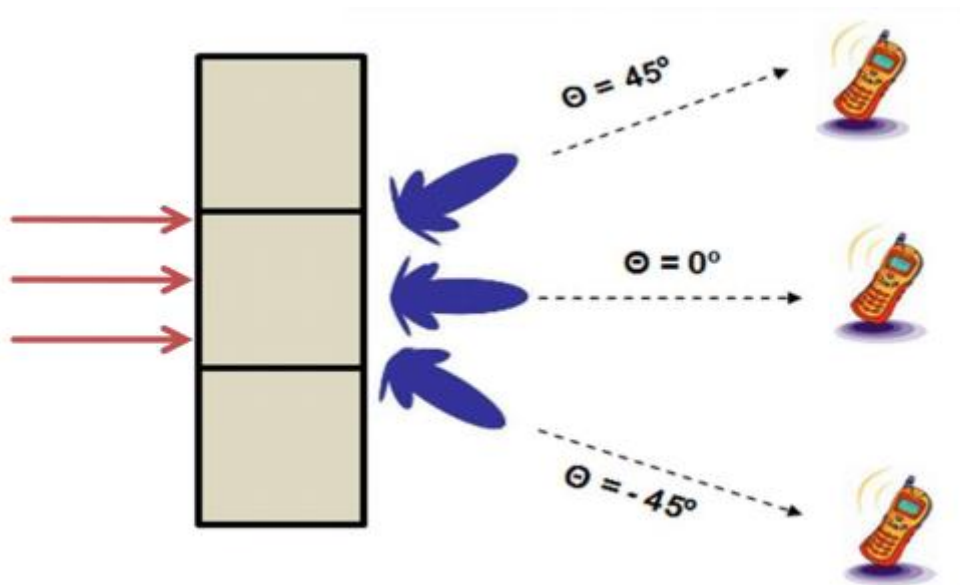


Figura 5.4. Colocación 10 usuarios frente a la BTS 45° y -45° .

5.2 Simulaciones.

5.2.1 Dispersión Laplaciana vista por BTS.

En este apartado se observa como la dispersión observada por el receptor o lo que es lo mismo, la dispersión vista por la estación base se va modificando según el número de usuarios.

Para ello primero se obtendrá la dispersión Laplaciana de cada uno de los usuarios y posteriormente se suman todas de manera que si hay un número de usuarios elevado, al sumar todas sus Gaussianas como los usuarios estarán más próximos los unos de los otros, la suma obtendrá una forma uniforme.

Para observarlo se fija un plano XY, es decir, se fija la variable Φ y se va cogiendo muestras de la dispersión conjunta a lo largo del eje z, es decir, la variable θ se va modificando hasta obtener 31 muestras a lo largo del ángulo fijado. Esto se realiza sobre 31 ángulos fijados.

Cuando el ASA toma un valor de 180° , debido al ancho de la Gaussiana, en las gráficas en 3 dimensiones no se aprecian con claridad los picos de las Gaussianas orientadas a los usuarios, por lo que se realizará un corte paralelo al plano horizontal que pase por el máximo de la dispersión angular.

5.2.1.1 Dispersión angular. 2 usuarios, $ASA = 180^\circ$.

La figura 5.5 muestra la dispersión angular observada por la BTS con 2 usuarios. Se muestra mediante un corte transversal paralelo al plano horizontal. Se observan claramente los dos picos orientados a cada uno de los usuarios en una situación ideal, con un ASA de 180° .

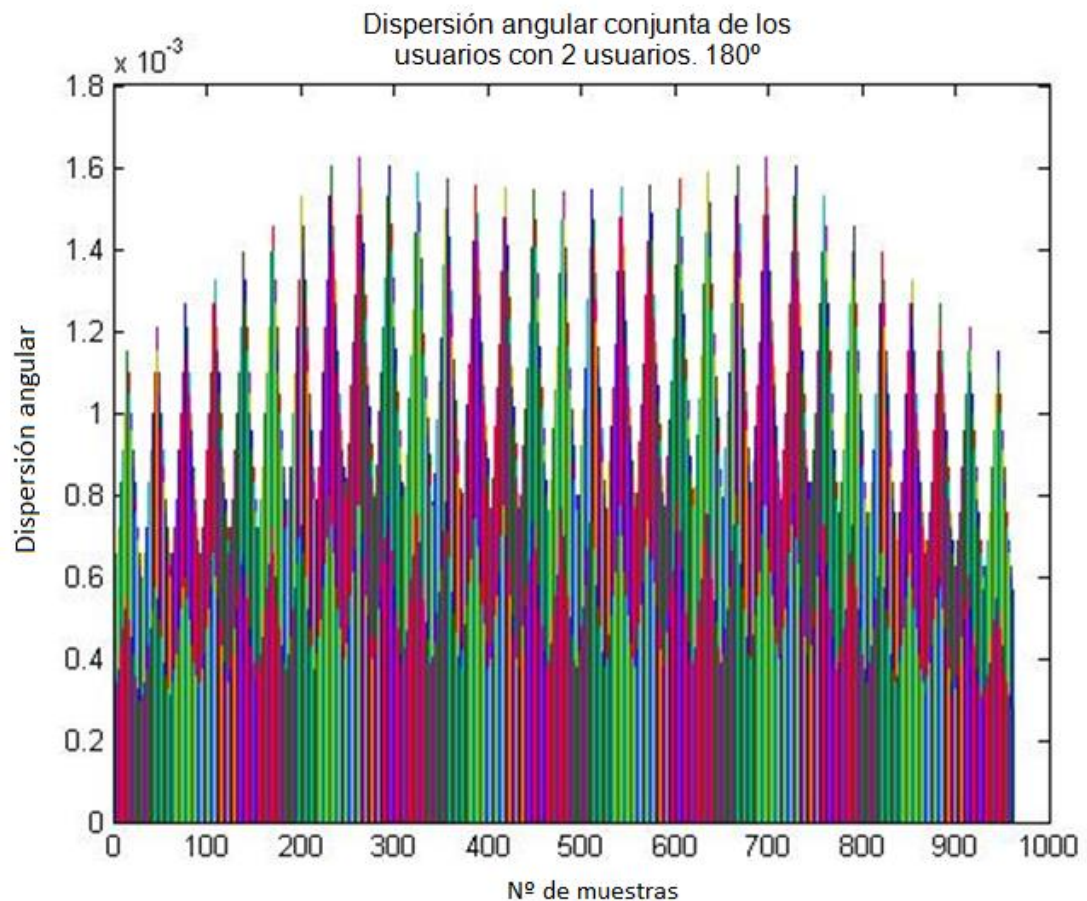


Figura 5.5. Dispersión angular con 2 usuarios, 180°

5.2.1.2 Dispersión angular. 3 usuarios, $ASA = 180^\circ$.

De igual manera sucede con 3 usuarios. En la figura 5.6 se observan los 3 picos orientados a cada usuario, aunque más leves.

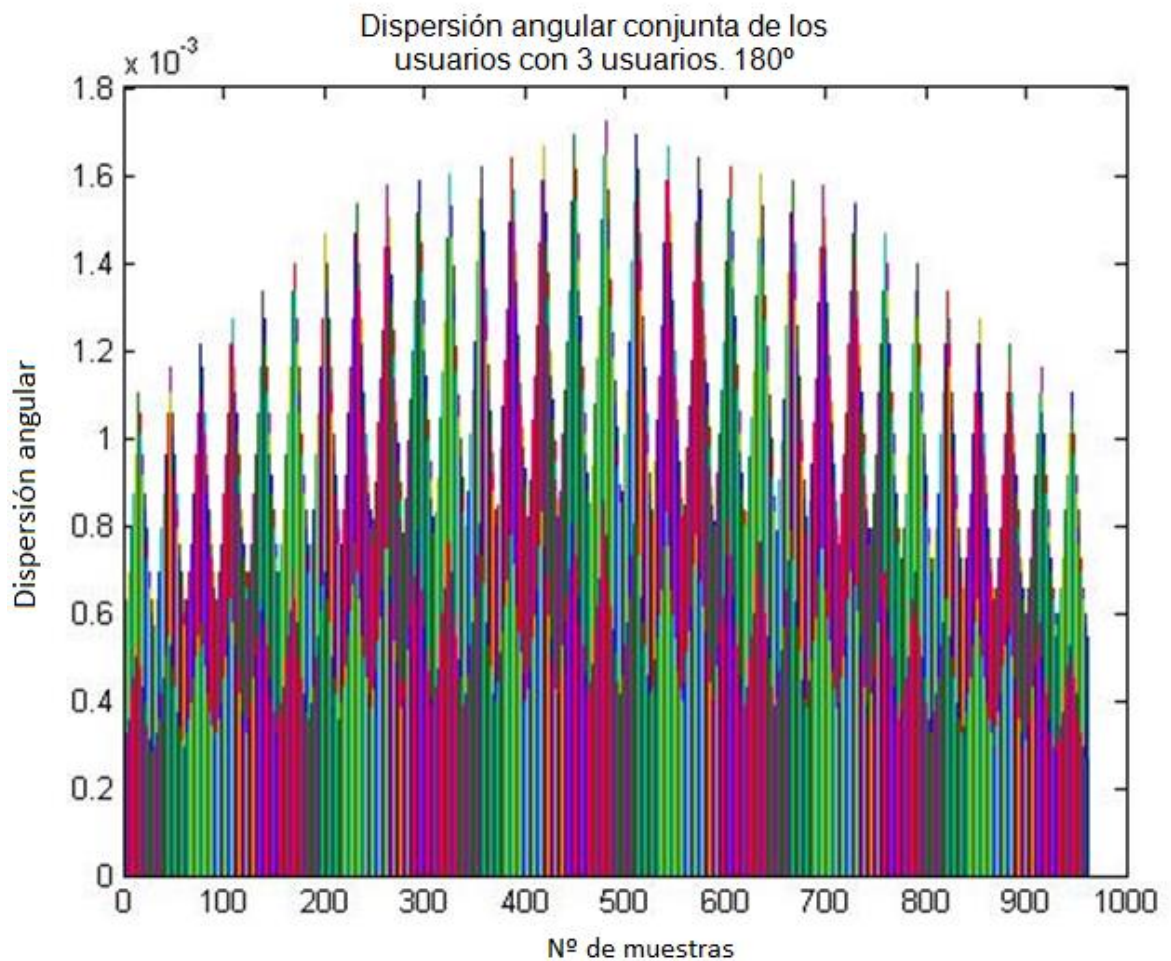


Figura 5.6. Dispersión angular con 3 usuarios, 180°

Como se observa, según se vaya incrementando el número de usuarios esos picos se irán suavizando y se irá convirtiendo en una uniforme en dirección a los usuarios. A partir de los 5 usuarios los picos dejan de distinguirse.

5.2.1.3 Dispersión angular. 15 usuarios, $ASA = 180^\circ$.

En la figura 5.7 se observa como con 15 usuarios ya no se perciben estos picos de los que hablamos y que como cada vez que va incrementando el número de usuarios la Gaussiana va disminuyendo su amplitud.

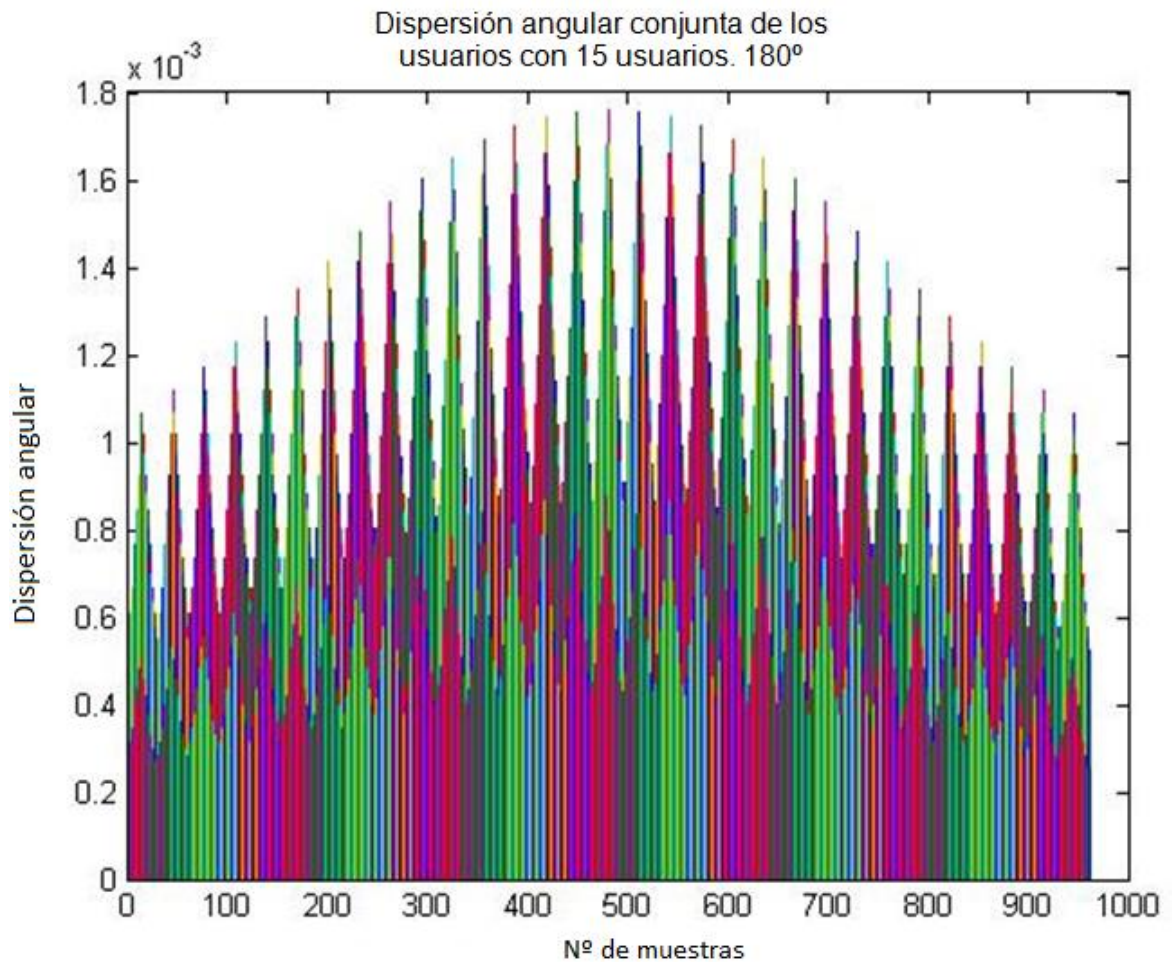


Figura 5.7. Dispersión angular con 15 usuarios, 180°

5.2.1.4 Dispersión angular. 2 usuarios, $ASA = 30^\circ$.

En los siguientes apartados se visualizarán los mismos casos que en el anterior pero en una situación real, con un valor de ASA de 30° .

La figura 5.8 muestra la dispersión angular observada por la BTS con dos usuarios. En este caso se observa todavía más claramente los dos picos orientados a cada uno de los usuarios.

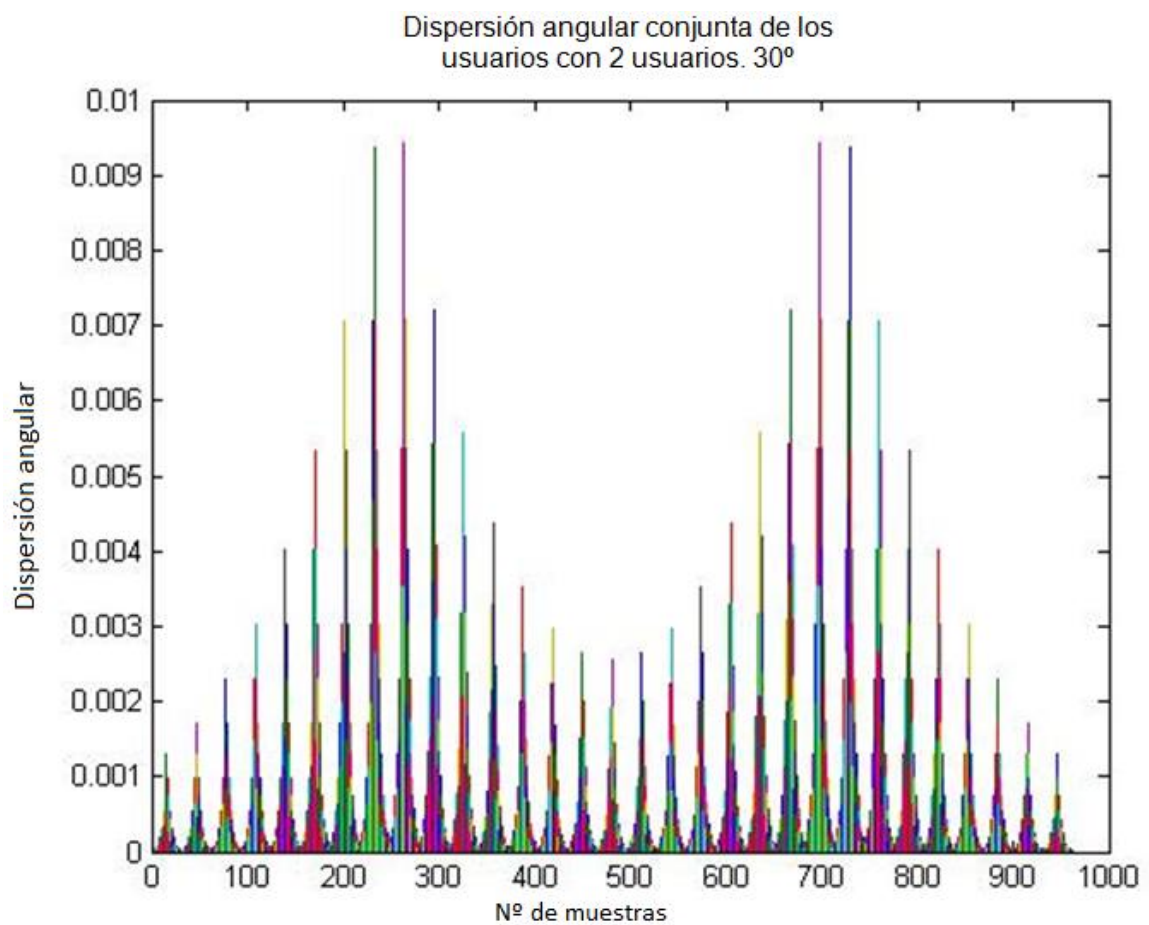


Figura 5.8. Dispersión angular con 2 usuarios, 30° , 2D

En este caso, es necesario un número mayor de usuarios para dejar de distinguir los picos de las Gaussianas y obtener una uniforme en dirección a los usuarios.

En la figura 5.9 observamos la misma figura que en 5.8, pero en tres dimensiones. Se pueden observar las muestras tomadas en los 31 planos comentados previamente. Se observan de la misma manera los 2 picos de la Laplaciana.

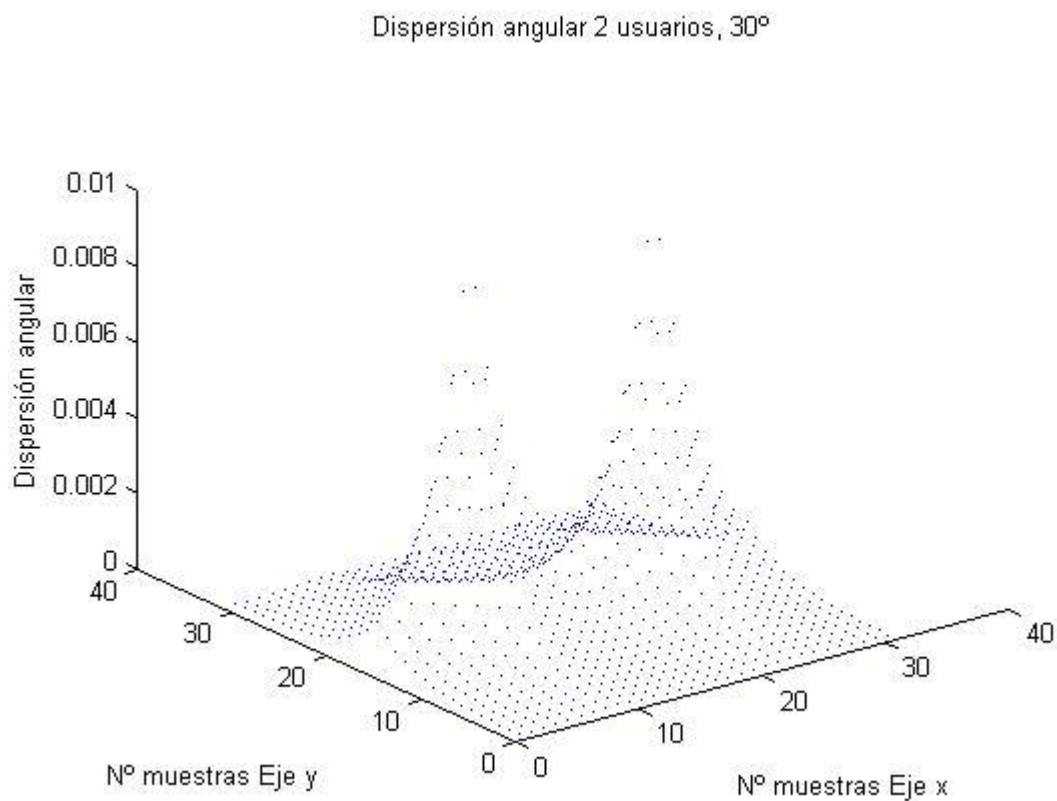


Figura 5.9. Dispersión angular con 2 usuarios, 30°, 3D

5.2.1.4 Dispersión angular. 5 usuarios, $ASA = 30^\circ$.

En la figura 5.10 se observa cómo con 5 usuarios se siguen distinguiendo las Gaussianas. Por tanto ya supera al número de usuarios necesario con una dispersión angular de 180° para que desaparezcan las Gaussianas. En una situación real será necesario al menos 8 usuarios para empezar a visualizar la uniforme.

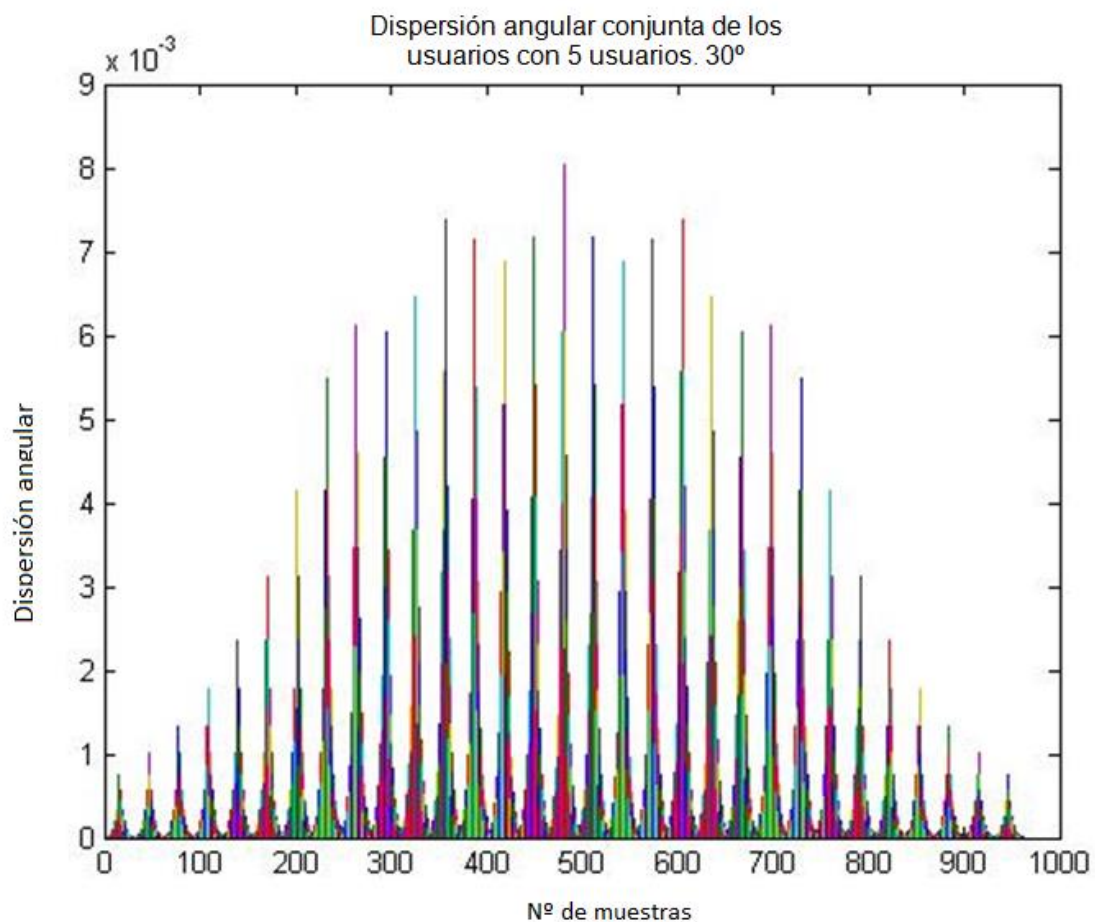


Figura 5.10. Dispersión angular con 5 usuarios, 30° , 2D

De igual manera, en la figura 5.11 observamos cómo los 5 picos dirigidos a cada usuario cada vez son menos pronunciados. Poco a poco van desapareciendo hasta convertirse en una uniforme.

Dispersión angular 5 usuarios, 30°

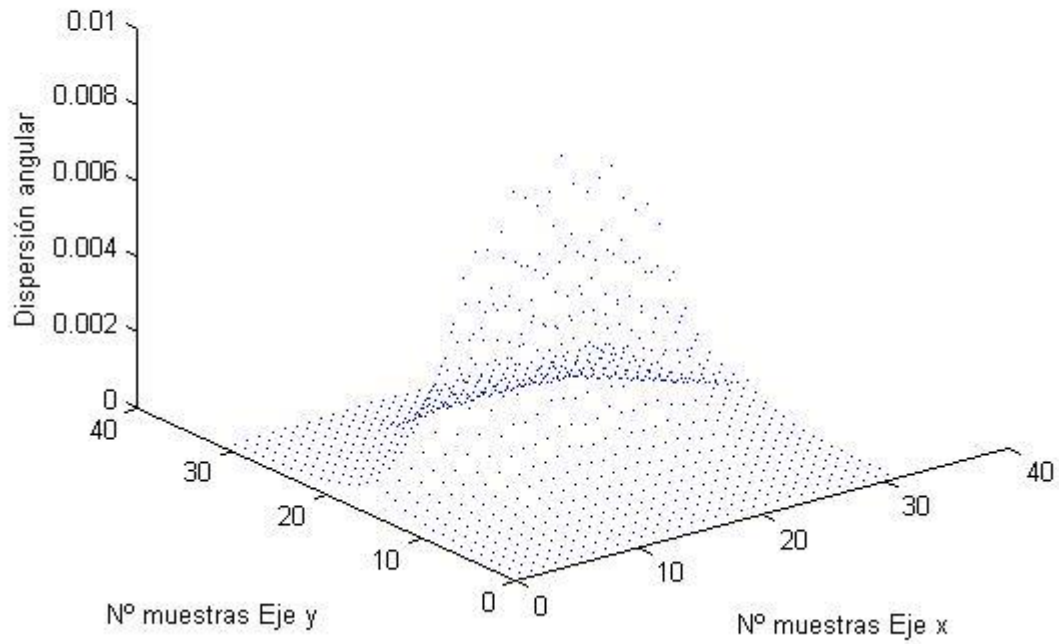


Figura 5.11. Dispersión angular con 5 usuarios, 30°, 3D

5.2.1.4 Dispersión angular. 25 usuarios, $ASA = 30^\circ$.

Por último, con 25 usuarios observamos lo mismo que en el caso anterior, sin picos obtenemos la uniforme:

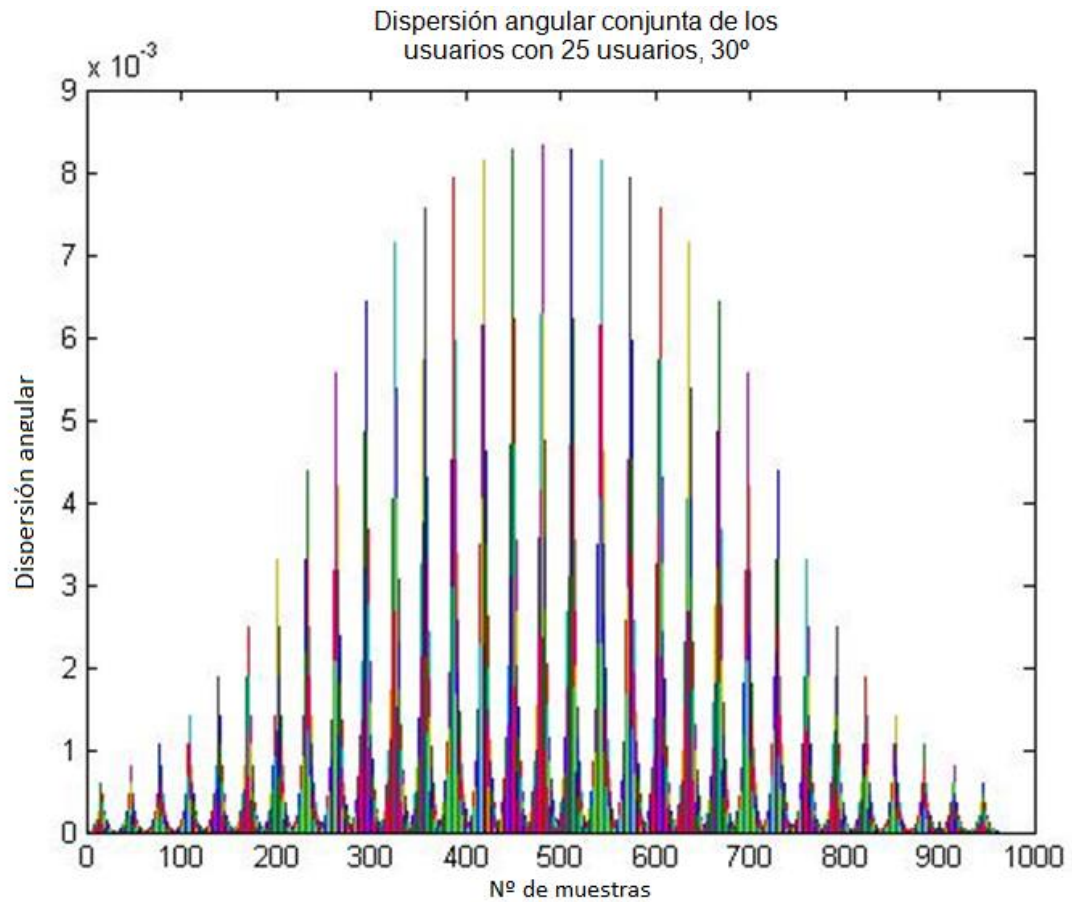


Figura 5.12. Dispersión angular con 25 usuarios, 30° , 2D

Dispersión angular 25 usuarios, 30°

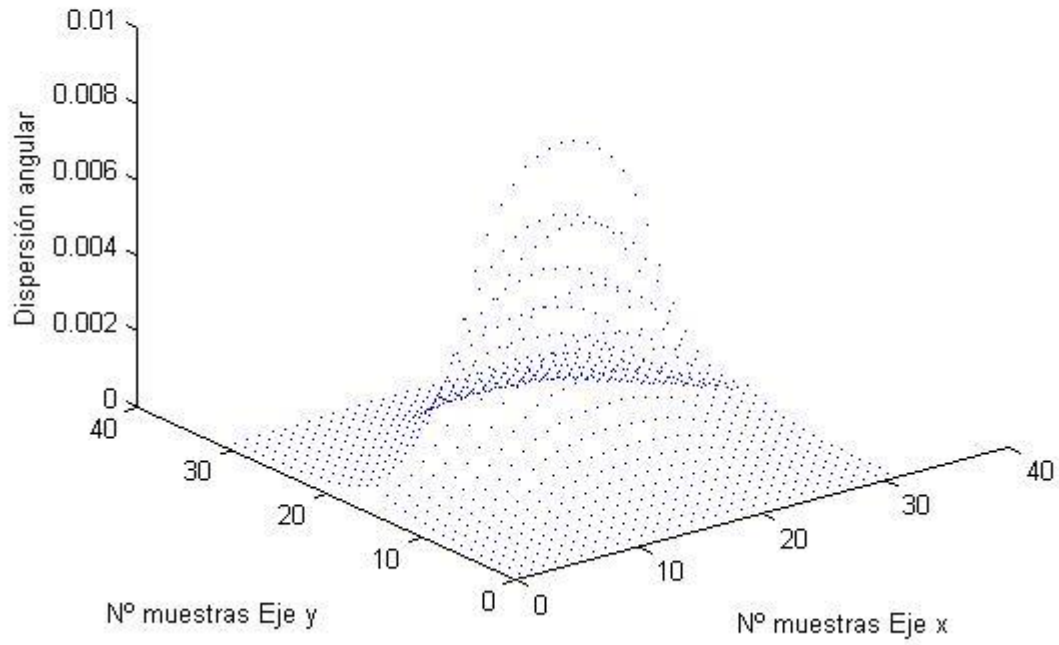


Figura 5.13. Dispersión angular con 25 usuarios, 30°, 3D

5.2.2 Capacidad.

Por último se busca analizar las prestaciones del sistema según se va a incrementando el número de usuarios y, por tanto, la dispersión angular del receptor va dejando de ser Laplaciana para convertirse en una uniforme. Además también se analizará la capacidad según el SNR del sistema.

5.2.2.1 Capacidad $ASA = 30^\circ$

El escenario sigue siendo el comentado anteriormente, el número de usuarios varía para observar la mejora de la capacidad, los valores de la SNR también varían entre los valores de 0 a 20 dBs. La BTS será la receptora con 100 antenas y cada usuario tendrá 10 antenas transmitiendo.

En la figura 5.14 se estudia como es la capacidad para 2, 5, 10 y 20 usuarios. para valores de la SNR comprendidos entre 0 y 20 dBs y para un valor de ASA de.

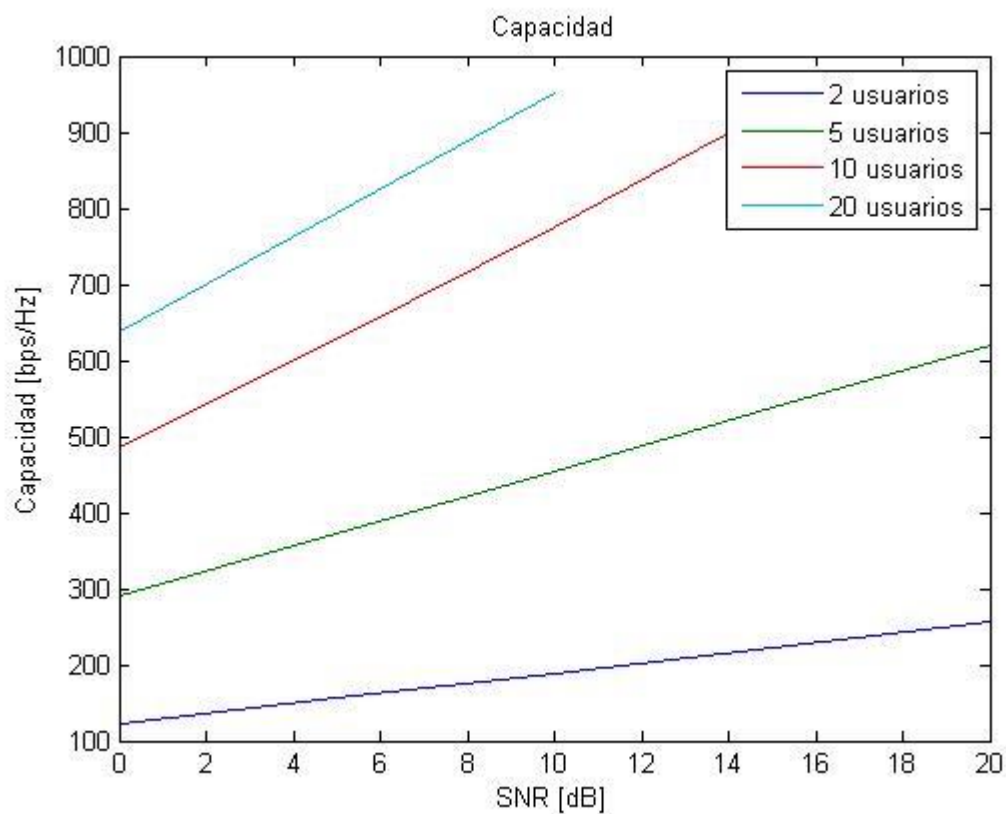


Figura 5.14. Capacidad 2, 5, 10 y 20 usuarios, 30°

5.2.2.1 Capacidad ASA= 180°

Este caso es exactamente igual que el anterior. En la figura 5.15 se observa cómo se comporta la capacidad, pero para un valor de ASA de 180°.

Como podemos ver, no se observa gran diferencia.

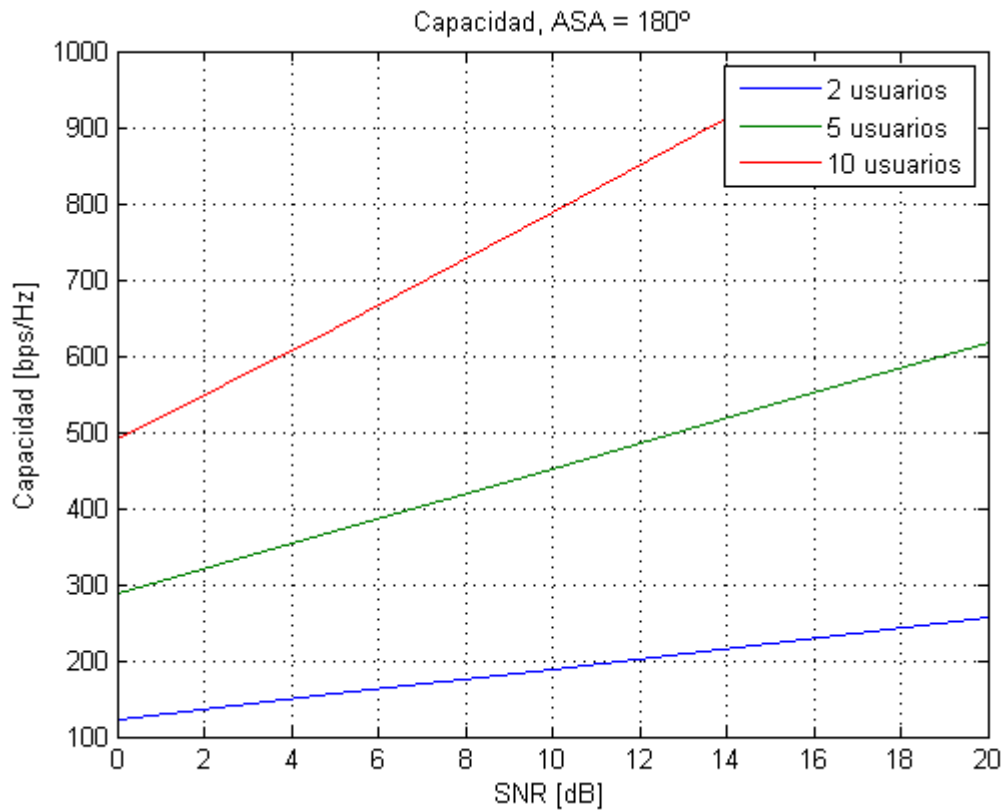


Figura 5.15. Capacidad 2, 5, y 10 usuarios, 180°

Como se puede observar y ya se ha comentado antes, según va creciendo el número de usuarios, la capacidad va aumentando. Por otra parte también cuanto mayor SNR tenga el sistema, la capacidad también aumentará.

5.2.2.1 Capacidad según número de antenas transmisoras.

Ahora, se observará como varía la capacidad variando el número de antenas transmisoras de cada usuario o M . Como ya se ha estudiado previamente, cuanto menor sea el número de antenas transmisoras, menor será la capacidad del sistema.

Fijamos un valor de ASA de 30° y vamos a observar cómo, con el mismo número de usuarios, y un número de antenas por usuario o M distinto varía la capacidad.

En la figura 5.16 observamos cómo con $K=2$, es decir, 2 usuarios y un ASA de 30° varía la capacidad cuando el número de antenas por cada usuario varía de 2, 5 y 10 antenas.

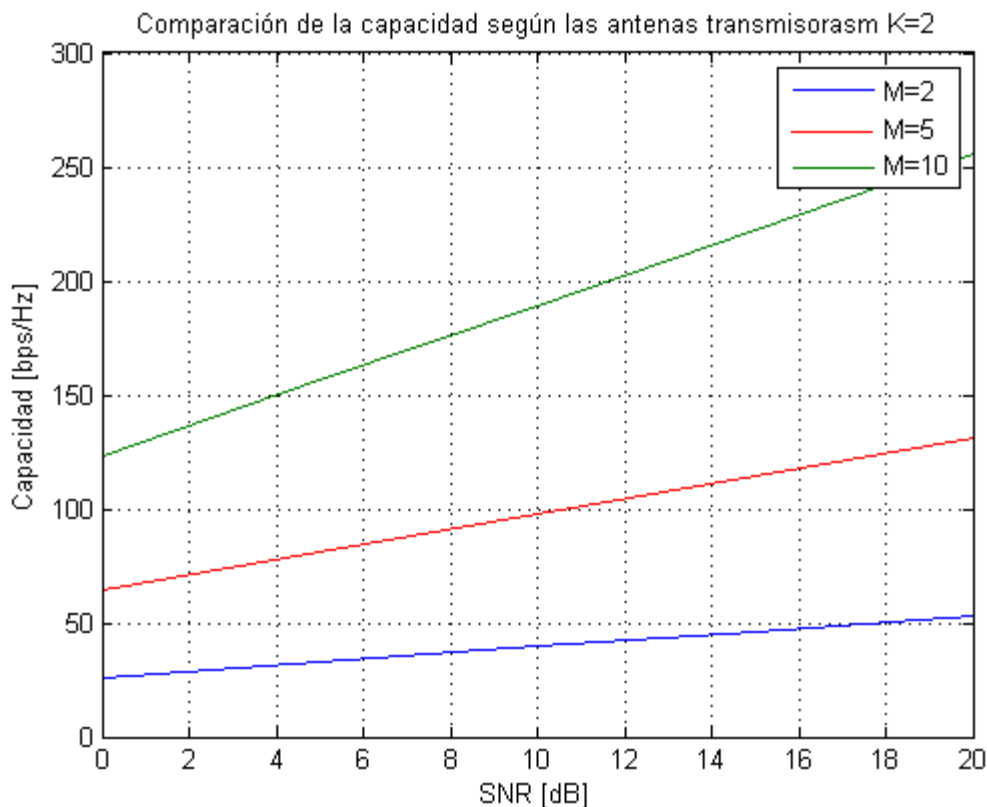


Figura 5.16. Capacidad $K=2$, $M=2, 5$ y 10 ASA = 30°

En la figura 5.17 se realiza lo mismo pero con un número de 5 usuarios, $K=5$.

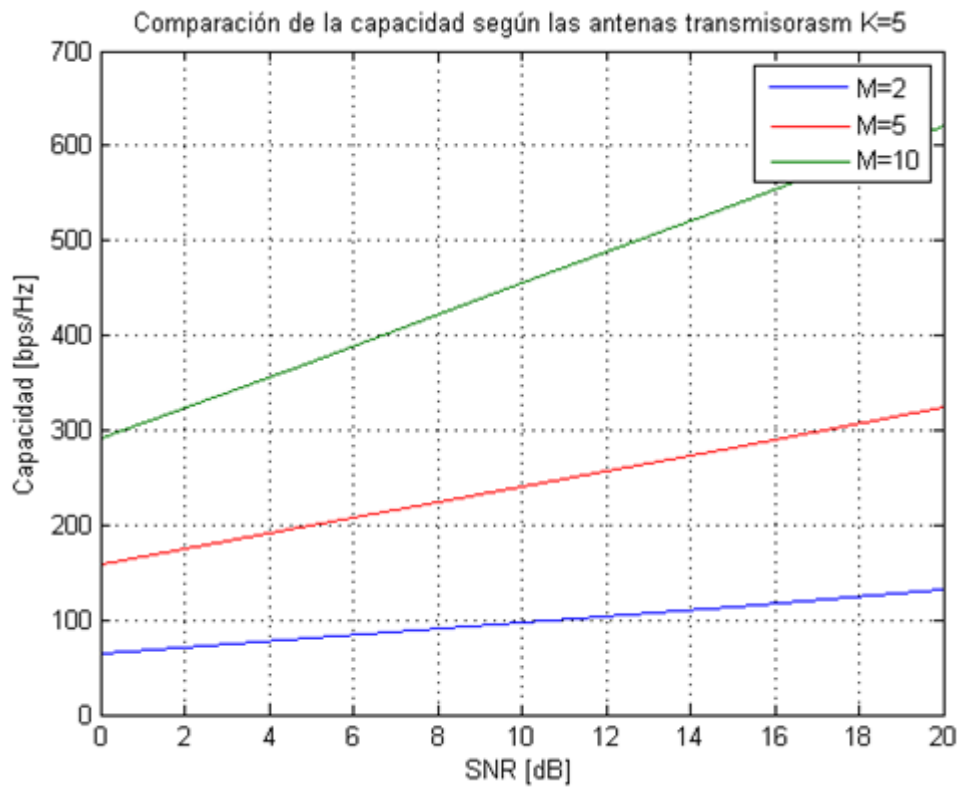


Figura 5.17. Capacidad K=5, M=2, 5 y 10 ASA = 30°

Por último, observamos la capacidad con 10 usuarios, del mismo modo con 2, 5 y 10 antenas por cada usuario transmisor.

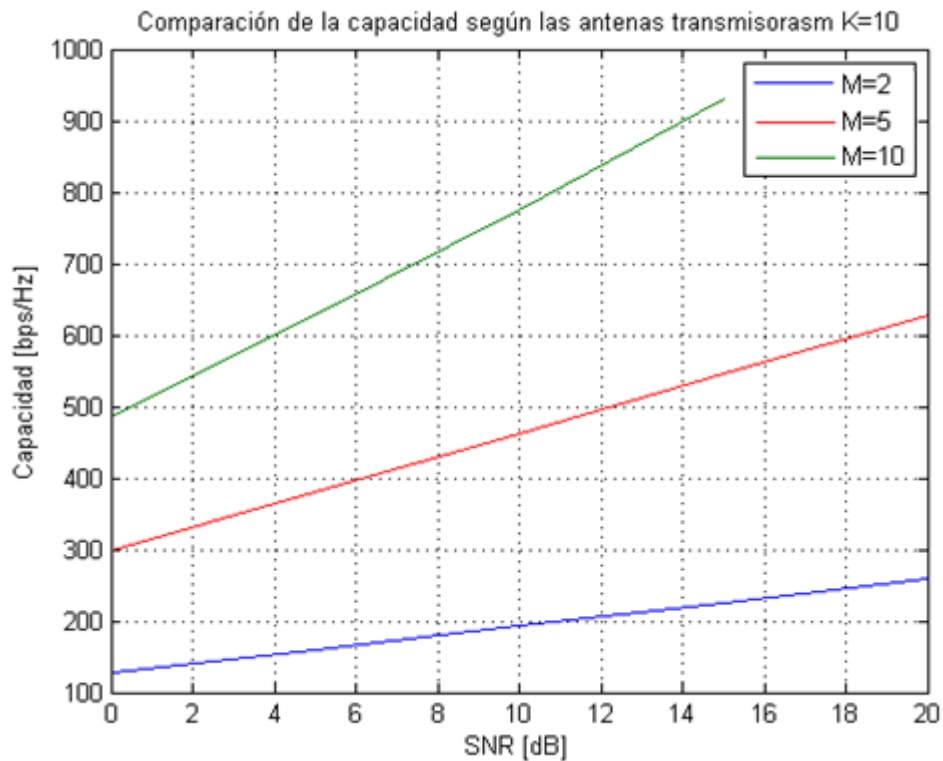


Figura 5.18. Capacidad K=10, M=2, 5 y 10 ASA = 30°



Podemos observar claramente, que según se incrementa el número de antenas transmisoras por cada usuario mejora la capacidad del sistema. Aparte de lo que ya hemos visto previamente, que a mayor número de usuarios mayor capacidad del sistema.

Chapter 6

Conclusions and future works.

The main objective of this project is the study of the:

- Capacity improved when the number of users is increased.
- The change of the Laplacian Angular dispersion of the receiver to a uniform dispersion when the number of users is increased, which also helps the capacity increase.

Referring to the angular dispersion study we can see how the angular dispersion in the receiver changes when the number of users is increased.

We can see that when in the MIMO system there are only two users, the distribution of the angular dispersion is two Gaussians oriented to each user, but when the number of user increases, the peaks of these Gaussians disappear gradually. At one point, when the number of users is high, these Gaussian peaks disappear completely, thus the angular dispersion has a uniform distribution that allows the improvement of the capacity system.

On the other hand, according to the capacity study we can check how the capacity of MIMO system improves when the number of users increases. The capacity also depends on the value of the SNR of the system. When the value of the SNR increases, the capacity also improves. In this simulation we can notice that when the system has only two user, the capacity for the same SNR is lower than capacity of the same system with five users. And the capacity of a system with five users (for the same SNR as well) is lower than capacity of the same system with ten users.

Future lines to follow are clear. These future lines consist on deepen in this massive MIMO systems adding antennas in mobile users and base stations. In this way we would have to face new and difficult challenges to solve the growing multiuser interferences using the study of the angular dispersion developed in this project and using other techniques more complicated.



Universidad
Carlos III de Madrid



APPENDIX



Universidad
Carlos III de Madrid

A. Entorno socio-económico, presupuesto y plan de trabajo.

A continuación se analizará brevemente el entorno socio-económico en el que se lanzaría el proyecto descrito en este trabajo. También se realizará un plan de trabajo y un presupuesto.

1. Entorno socio-económico

Como se ha estudiado previamente, la sociedad actual se encuentra en un momento en el que cada vez demanda mayor tasa binaria y capacidad para los sistemas inalámbricos que utilizan en su vida cotidiana. Esto es debido a que cada vez más usuarios utilizan sus dispositivos para la subida y bajada de archivos pesados a grandes velocidades. Estas comunicaciones contribuyen a la mejora de la calidad de vida, por este motivo los sistemas deben estar previstos para su masificación.

El desarrollo e implementación de un sistema MU-MIMO masivo como el que se ha estudiado en este proyecto en la actualidad es muy apropiado para obtener lo que tanto demandan los clientes y que se ha demostrado que los sistemas MU-MIMO lo consiguen. A parte de esto, los sistemas MIMO multiusuario masivos amplía el área de cobertura alcanzando distancias mayores sin aumentar la potencia de transmisión gracias a las técnicas de diversidad. También aumenta la fiabilidad y disminuye el coste debido a que con un único punto de acceso o estación base se comunica con múltiples usuarios.

En [14] podemos observar cómo para el año 2015 existe un contexto económico más favorable que algunos periodos anteriores. La CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia) sigue cumpliendo con su misión de garantizar la libre competencia y regular todos los mercados y sectores productivos de la economía española para proteger a los consumidores. En 2015 se han llevado a cabo procesos de concentración de mercado debido a la amplia diversificación que sufrió el mercado después de la liberación del antiguo monopolio. Una de estas concentraciones será entre operadores de segmento fijo y de segmento móvil como por ejemplo, la adquisición de los activos de ONO por Vodafone, en 2014.

Estas uniones se deben a la necesidad de los distintos competidores de fortalecer sus posibilidades de competir en el mercado. Pero es necesario algo más para que cada competidor diferencie su oferta. Es por este motivo por el que las grandes empresas (resultado de las uniones) se muestren interesadas por nuevas ideas que permitan proporcionar a los consumidores sus demandas, además de aprovisionarse de sistemas de comunicaciones que permitan la masificación de usuarios. Por estos motivos, el sistema de comunicaciones MIMO masivo presentado en el presente trabajo suscitara interés en las grandes empresas.

2. Presupuesto

A continuación se analizará el presupuesto destinado para la realización del proyecto expuesto en el presente trabajo. Los costes del proyecto se dividen en dos campos:

- Coste material
- Horas dedicadas a la realización del proyecto

En cuanto al material, tenemos los siguientes gastos:

COSTE MATERIAL		
Ordenador	Licencia de estudiantes de MATLAB	TOTAL
800 €	69 €	869 €

Los costes materiales se componen principalmente por un ordenador con el que realizar las simulaciones y la licencia del software de MATLAB.

En cuanto a las horas dedicadas a la realización del proyecto, se contabilizarán mediante las horas dedicadas por el alumno y el supervisor del proyecto asignando un valor económico a cada hora trabajada.

El alumno dedicará a la realización del proyecto un total de 410 horas que se remuneraran con 6 € por hora.

Por otra parte, el supervisor del proyecto dedicará 100 horas a la supervisión del proyecto remuneradas con 35 € por cada hora trabajada.

Por tanto el coste de recursos humanos se resume en la siguiente tabla:

COSTE RRHH			
RRHH	€/hora	Horas trabajadas	Coste TOTAL
Alumno	6€/h	410 h	2.460 €
Supervisor	36€/h	100 h	3.600 €
TOTAL	6.060 €		

Por tanto el coste total de proyecto, contando con los costes materiales y costes de recursos humanos ascienden a 6.929 €

3. Plan de trabajo

A continuación se estudiará el plan de trabajo necesario para la realización del proyecto. Debido a que se trata de un estudio teórico mediante la realización de simulaciones el plan de trabajo no cuenta con un gran número de pasos.

El diagrama de Gantt del proyecto quedaría de la siguiente manera:

Tarea	Fecha de Inicio	Duración (días)
Estudio previo	01/02/2016	30
Planteamiento de los objetivos	01/02/2016	10
Estudio teórico de MIMO	11/02/2016	20
Planteamiento del sistema MIMO	02/03/2016	10
Implementación en MATLAB	12/03/2016	60
Diseño del sistema MU-MIMO	12/03/2016	20
Posicionamiento usuarios	01/04/2016	6
Calculo dispersión angular y capacidad	07/04/2016	14
Simulaciones	21/04/2016	20
Realización de memoria	11/05/2016	40
Escritura	11/05/2016	30
Revisión y corrección	10/06/2016	10



B. PROJECT EXTENDED ABSTRACT

Designing of a massive multiuser MIMO system of communications

1. Introduction

1.1 State of the art.

Nowadays, wireless communication has a great importance in the society, because they are part of our daily life and it could be difficult to conceive a day without Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee or NFC (Near Field Communications) technology.

It is necessary to look for a new technology that improves the service as well as the maximum number of users allowed in this type of communication because of the use of these technologies and the demand of the users that is increasing every day.

MIMO technology solves the different issues that the previous technologies have by offering higher transmission rates, higher area coverage, higher user capacity and more reliability. Although, the most important characteristic of MIMO is that all the improvements mentioned above are made without the increase of the bandwidth.

The first ideas about MIMO appeared at the beginning of the 70s with the first investigations by A.R Kaye, George D.A and W. Van Etten [3] [4]. Between 1984 and 1986 numerous articles on the “beamforming” or forming antenna beams were published by Bell Labs, with Jack Winters and Jack Salz [5] [6]. In 1994, Stanford University (California) patented the “Spatial Multiplexing” [7], but is in 1998 when the first prototype of spatial multiplexing is created by Bell Labs [8]. This prototype is the key technique to the development of a communication MIMO system.

MIMO can cover the transmitted capacity issue by sending and receiving the information by several antennas. One of the most important concepts to understand MIMO and its progress is the diversity of the channel. Diversity could be explained as the transmission of multiple copies of the same signal through different paths, this is possible by using multiple antennas in the transmission and/or reception. Depending on the number of antennas that are transmitting and receiving we have the following MIMO technology predecessors systems: SISO (Single-Input, Single-Output), MISO (Multiple-Input, Single-Output), SIMO (Single-Input, Multiple-Output) and MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output). MIMO is divided into two categories: SU-MIMO (Single User MIMO) and MU-MIMO (Multi User MIMO).

The downside of Single User MIMO is that the multiple streams of data must be sent or received just by one device at the same time, although it requires multiples antennas that add cost, weight and size [10]. MU-MIMO (Multi User MIMO) (802.11ac wireless standard) enhances the MIMO technology by enabling the simultaneously

transmission of those multiple streams through different devices, in other words, an access point is capable of sending several data streams simultaneously. [10]

1.2 Objectives.

The main motivation of this project is to try to maximize the capacity in the uplink MIMO channel, in other words, the communication between multiple users with the base station for a MIMO multiuser system. This is done by means of studying how different distributions of users affect the channel matrix characteristics and therefore the channel capacity.

Therefore, the objectives of this final project are:

- Study the state of art of MIMO systems. First, we have been studying the MIMO technology predecessors systems like SISO, MISO and SIMO. Secondly, we have been studying MIMO technology, its subcategories SU-MIMO or point to point and MU-MIMO or point to multipoint and its benefits.
- Review the different alternatives algorithmic proposed for multiuser MIMO systems.
- Develop and implement a MIMO channel model with different user distributions. We have been investigating how angular dispersions changes when the number of users increases, and how it affects the system capacity.

All the objectives explained above are made in order to analyze the results and make a subsequent comparison of these results. Finally, the conclusions reached after making the necessary simulations are presented in order to analyze the results and compare them under all conditions considered.

2. MIMO

MIMO technology involves the use of multiple antennas at both transmitting and receiving in wireless communications.

A MIMO system, unlike previous systems, treats the multipath effect as an advantage because each route is seen as a different channel. Thus, it is possible to send more data by multiple antennas if they are spatially separated enough. The maximum rate per channel will grow linearly with the number of sub-streams of different data being transmitted on the same channel [9] [11].

According to the capacity system, it grows due to the linear increase of MIMO spectral efficiency compared with other systems that use a single antenna, as well as the coverage area, BER (Bit Error Ratio), bits rate, number of users and cost [12].

MIMO is divided into two categories:

2.1 SU-MIMO (Single User MIMO)

SU-MIMO is the technology applied to a single user also called point to point. The main techniques used in SU- MIMO are:

- *BLAST* (Bell Laboratories Architecture Layered Space-Time).
- *PARC* (Per Antenna Rate Control).
- *SPARC* (Selective Per Antenna Rate Control).

In the SU- MIMO system, with one transmitter and one receiver, we can see that for each transmitting antenna 4 information flows are required, one for each receiving antenna.

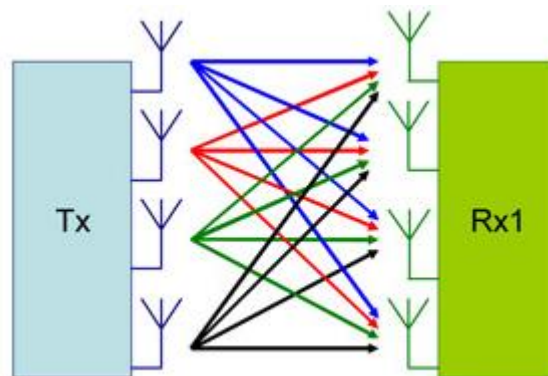


Figure B.1. SU-MIMO transmission.

2.2 MU-MIMO (Multi User MIMO).

In a MU- MIMO system, we can check that the number of streams is reduced. In this case we have two flows for each transmit antenna, one for each user.

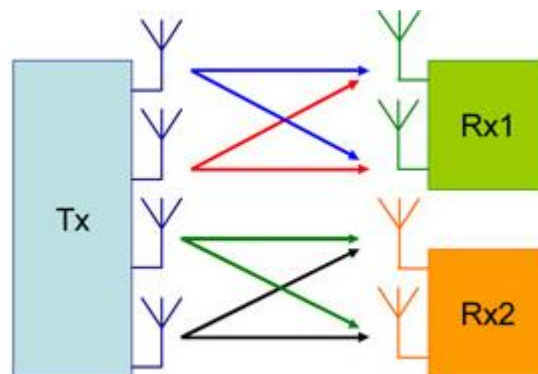


Figure B.2. MU-MIMO transmission.

MU-MIMO also is divided into two categories:

- Point to multipoint.
- Multipoint to multipoint.

In the category of point to multipoint we have two type of channel.

MIMO BC (Broadcast) represents the downlink. In this channel there is only one transmitting point and the transmitted power is fixed. The information streams are sent to many users then all transmitted information signal is associated with a noise component.

The other type of channel is MIMO MAC (MIMO Multiple Access Channel) and it represents the uplink. With this channel users transmit the data streams simultaneously to one receiver (base station) with a number of antennas higher than the user.

The advantage of this channel compared to the channel BC is that there is only one receiver, thus only one noise component is added. There is a power associated with each of the transmitted signals or each transmitter. This is the reason why transmission power is not fixed, in other words, the transmission power is multiplied by each transmitter.

3. Chanel MIMO

MIMO channel is defined with the matrix H . This matrix determines the losses of the channel between the transmitter and the receiver.

In the next figure we can see a diagram of MIMO channel.

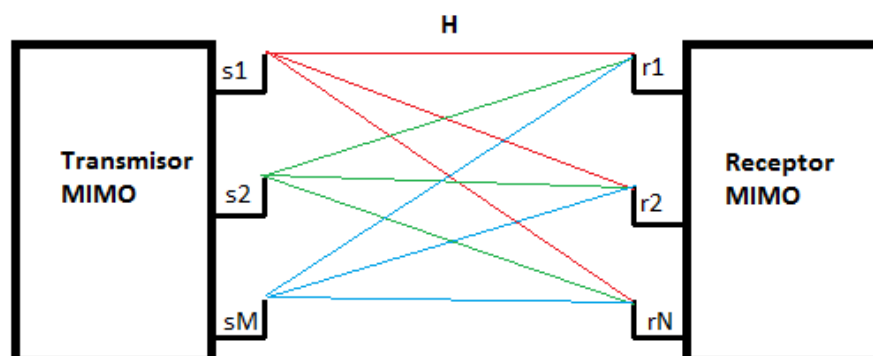


Figure B.3. Schematic MIMO channel.

Where M is the number of antennas transmitting and N is the number of antennas receiving. From the figure above we obtain the following relation of input and output:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (\text{B.1})$$

Where:

\mathbf{r} : received data vector ($N \times 1$)
 \mathbf{s} : sent data vector ($M \times 1$)
 \mathbf{n} : additive noise vector ($N \times 1$)
 \mathbf{H} : MIMO channel matrix ($N \times M$)

3.1 Channel matrix \mathbf{H} .

MIMO channel matrix is calculated with the next formula [16] [17]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^* \mathbf{S} \mathbf{B}_M \quad (\text{B.2})$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{jk'_1 r'_1} & e^{jk'_2 r'_1} & \dots & e^{jk'_L r'_1} \\ e^{jk'_1 r'_2} & e^{jk'_2 r'_2} & \dots & e^{jk'_L r'_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{jk'_1 r'_N} & e^{jk'_2 r'_N} & \dots & e^{jk'_L r'_N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S(k'_1, k_1) & S(k'_1, k_2) & \dots & S(k'_1, k_L) \\ S(k'_2, k_1) & S(k'_2, k_2) & \dots & S(k'_2, k_L) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S(k'_L, k_1) & S(k'_L, k_2) & \dots & S(k'_L, k_L) \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} e^{-jk_1 r_1} & e^{-jk_2 r_1} & \dots & e^{-jk_L r_1} \\ e^{-jk_1 r_2} & e^{-jk_2 r_2} & \dots & e^{-jk_L r_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e^{-jk_1 r_N} & e^{-jk_2 r_N} & \dots & e^{-jk_L r_N} \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Where \mathbf{B}_N and \mathbf{B}_M are rectangular matrices which depend on the transmitter and receiver antenna geometry. These matrices describe the spatial position of the transmitting and receiving antennas respectively by:

$\langle r'_1, r'_2, \dots, r'_N \rangle$ y $\langle r_1, r_2, \dots, r_M \rangle$.

\mathbf{S} matrix is a rectangular matrix that describes the existing dispersion in the channel.

The \mathbf{G} matrix is formed by complex Gaussian random variables and independent.

Assuming that the channel is Gaussian and the dispersions are independent between each other, we can simplify the channel matrix as:

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_N^* \boldsymbol{\Sigma}_R^{\frac{1}{2}} \mathbf{G} \boldsymbol{\Sigma}_T^{\frac{1}{2}} \mathbf{B}_M \quad (\text{B.4})$$

3.2 Channel capacity

Channel capacity (by Shanon theorem in c.1) is defined as the maximum rate that the channel can support without errors, in other words, a measure of how much information can be transmitted with a zero error probability.

Single User MIMO system capacity is a scalar. This capacity is invariant over time.

However, multiuser MIMO system capacity limitations are defined by a K-dimensional region, where each point represents a vector formed by a set of transmission rates that are used by K users simultaneously.

$$\mathcal{C} = \log_2 \left\{ \det \left(\mathbf{I} + \frac{\text{SNR}}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\} \quad (\text{B.5})$$

4. Results

Now that we have studied the performance of a MMO communications system and the channel modeling, the results obtained through simulations of different scenarios will be observed.

Firstly, we will observe the angular dispersion of base station with a value of ASA value (scattering angle of the receiving antennas) 180 degrees. We will see how the distribution of the dispersion changes when the number of users that send information to the base station increases.

Secondly, we will see how distribution dispersion changes when the number of users that send information to the base station increases but now with a value of ASA equals to 30 degrees. Due to the value of the angular dispersion in real life takes values between about 30 and 50 degrees, the tests will be performed with a value of ASA 30 degrees.

Finally, it will be shown the performance of the channel in terms of the capacity. We will study capacity behavior when the dispersion distribution is transformed into a uniform.

4.1 Transmitters and receptor distribution

The following simulations are performed in the uplink or MAC channel, the base station will receive information with 100 antennas distributed as follows in the X and Y axes:

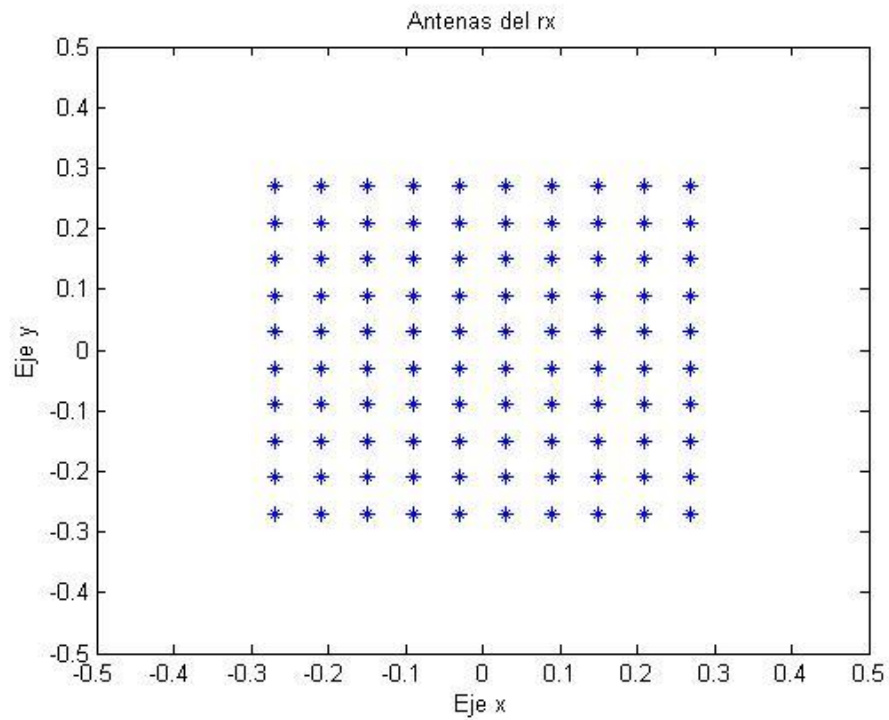


Figure B.4 Base station antennas distribution.

Moreover users transmit with 10 antennas distributed as follows:

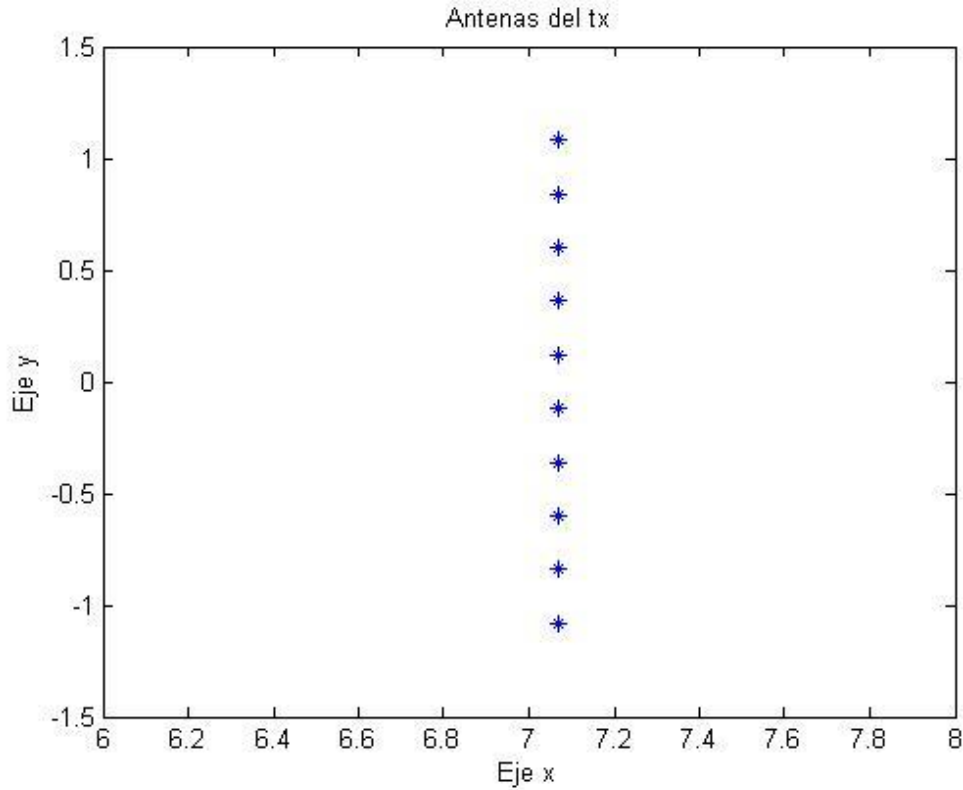


Figure B.5 Users antennas distribution

The simulations are performed with frequency equals to 2.5 GHz. The receiver or base station antennas are separated from each other 2λ , while transmitters or users antennas are separated one from another $\frac{\lambda}{2}$.

All users are in the same plane (angle $\theta = \frac{\pi}{2}$).

4.2 Angular dispersion.

The next simulations show how angular dispersion, observed by base station, changes when number of users increases.

First, Laplacian dispersion of each user is obtained, and then all these dispersions will be added. When the number of users is high and we add all Gaussians of each user they will be closer each other obtaining a uniform. To observe it, we will hold an XY plane, that is, we will hold Φ variable and we collect 31 measures varying θ variable. This will be repeated for 31 XY planes.

4.2.1 Angular dispersion, $ASA = 180^\circ$.

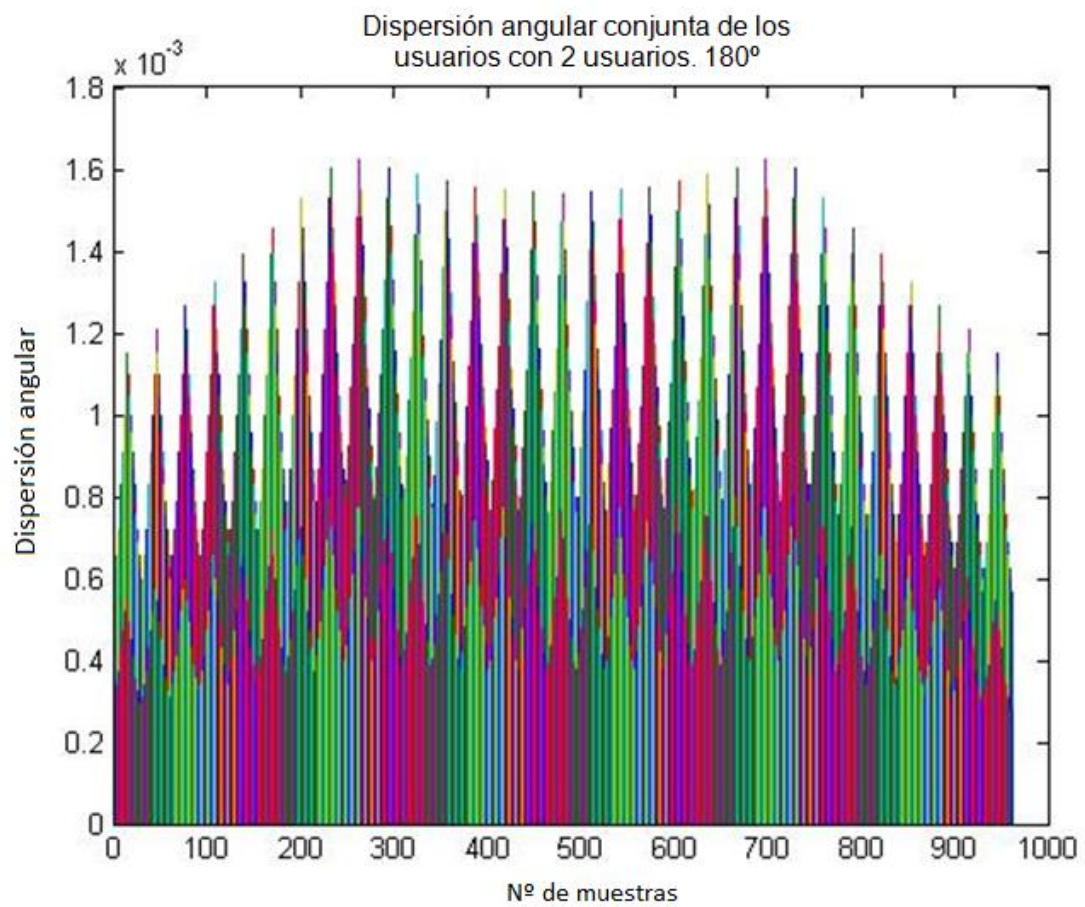


Figure B.6 Angular dispersion, 2 user, 180° .

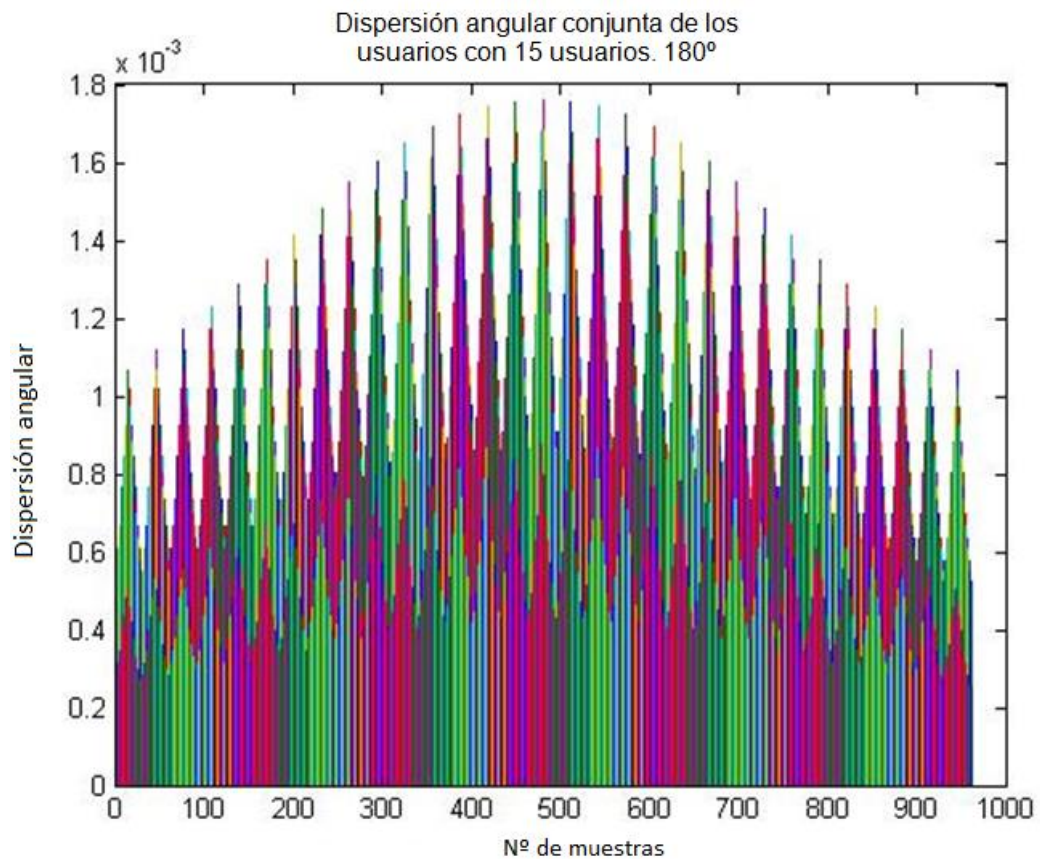


Figure B.7 Angular dispersion, 15 user, 180°.

In figure B.6, we can see the distribution of the angular dispersion that is the sum of two Gaussians oriented to each user. These two peaks of Gaussians added will gradually disappear when the number of users increases because the users will be closer to each other and then peaks of Gaussians will be closer too.

When the number of user is high, like in figure B.7 with a system with 15 users, we can see how these peaks don't exist. There is only one peak focused in direction to users.

4.2.2 Angular dispersion, $ASA = 30^\circ$

In this case, with $ASA = 30^\circ$, we can see better the peaks of these two Gaussians focused in direction to the two users because of the lower width of each Gaussian. In figure B.8 we can see the angular dispersion perceived by the base station that is the sum of all these Gaussians. Although it will be necessary more users in the system to get it, also with a high number of users the peaks of Gaussians disappear like in B.9

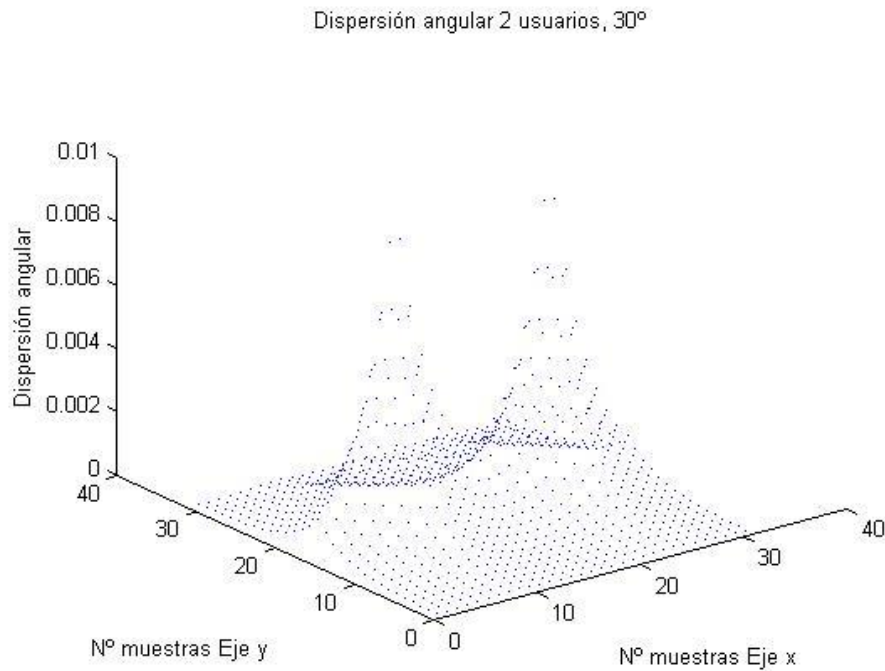


Figure B.8 Angular dispersion, 2 user, 30° .

Dispersión angular 25 usuarios, 30°

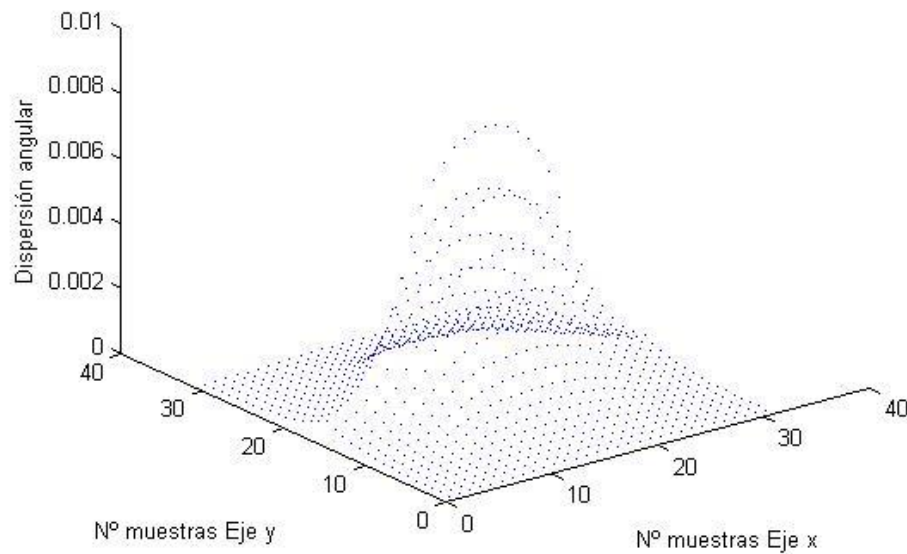


Figure B.9 Angular dispersion, 25 user, 30°.

4.2 Capacity.

Finally, we will analyze how system performance improves when the number of users increases massively and, therefore, the angular dispersion of the receptor changes from a Laplacian distribution to a uniform distribution. In addition, capacity system will also analyze according to the SNR.

The number of users varies to observe how capacity improves, SNR values also vary between the values of 0 to 20 dBs. The BTS will be the receiver with 100 antennas and each user will have 10 antennas transmitting.

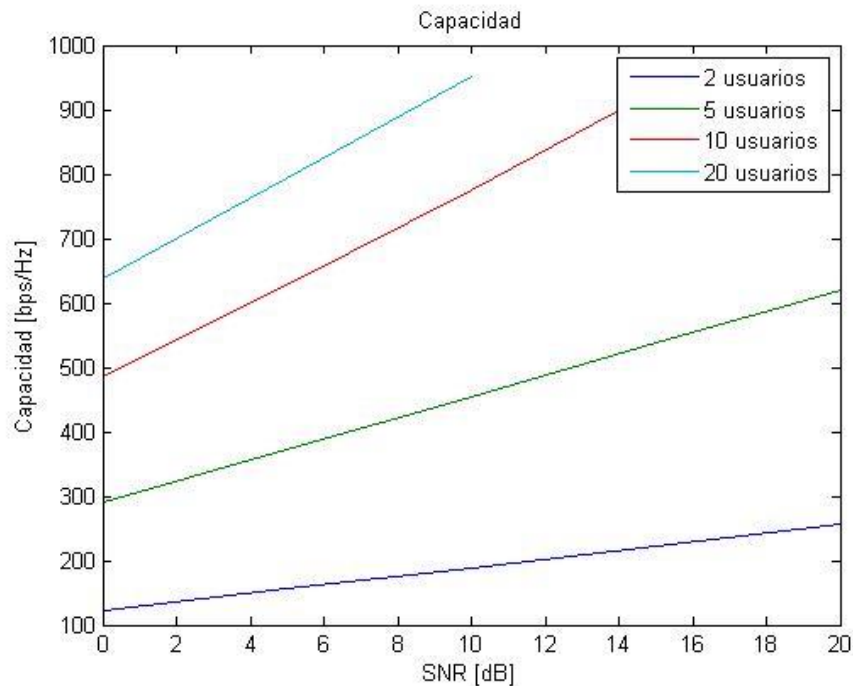


Figure B.10 Capacity .

We can observe in figure B.10 that when the number of users increases the system capacity improves. Moreover with a higher system SNR, the capacity also improves.

5. Conclusions and future works.

The main objective of this project is the study of the:

- Improvement of the capacity when the number of users is increased.
- The change of the Laplacian Angular dispersion of the receiver to a uniform dispersion when the number of users is increased, which also helps the capacity increase.

Referring to the angular dispersion study we can see how the angular dispersion in the receiver changes when the number of users is increased.

We can see that when in a MIMO system there are only two users, the distribution of the angular dispersion is two Gaussians oriented to each user, but when the number of user increases the peaks of these Gaussians disappear gradually. At one point, when the number of users is high, these Gaussian peaks disappear completely, thus the angular dispersion has a uniform distribution that allows the improvement of the capacity system.



On the other hand, according to the capacity study we can check how the capacity of MIMO system improves when the number of users increases. The capacity also depends on the value of the SNR of the system. When the value of the SNR increases the capacity also improves. In this simulation we can notice that when the system has only two users, the capacity for the same SNR is lower than capacity of the same system with five users, also the capacity of a system with five users (for the same SNR as well) is lower than capacity of the same system with ten users.

Future lines to follow are clear. These future lines consist on deepen in this massive MIMO systems adding antennas in mobile users and base stations. In this way we would have to face new and difficult challenges to solve the growing multiuser interferences using the study of the angular dispersion developed in this project and using other techniques more complicated.



Referencias

- [1] Gerard J. Foschini y Michael. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas". Wireless Personal Communications, Enero 1998.
- [2] J. Sharony, "Introduction to Wireless MIMO – Theory and Applications", Stony Brooks University, Noviembre 2006.
- [3] A.R. Kaye, D.A. George, y M. J. Eric, "Analysis and Compensation of Bandpass Nonlinearities for Communications," IEEE Trans. on Communications, Vol.21, Octubre 1972.
- [4] W. van Etten, "Synchronous digital transmission over multiple channel systems", PhD Tesis, Eindhoven University of Technology, Mayo 1976.
- [5] J.Winters, J. Salz y R. D. Gitlin "The Capacity Increase of Wireless Communication Systems with Antenna Diversity", Proc. of the Princeton Conference on Information Science and Systems, Marzo 1992.
- [6] J.Winters, J. Salz y R. D. Gitlin "The Impact of Antenna Diversity on the Capacity of Wireless Communication Systems"), IEEE Trans. on Communications, Abril 1994.
- [7] A.Paulraj y T.Kailath, "Increasing capacity in wireless broadcast systems using distributed transmission /directional reception". U. S. Patet 5, 345, 599, 1994.
- [8] G. J. Foschini "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas" Bell Labs. Tech. J., 1 (2): 41-59, 1996.
- [9] E.Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, P. Arogyaswami y H. Vincent, "MIMO Wireless Communications", Cambridge, 2007.
- [10] José Javier Anguís Horno, "Redes de área local inalámbricas: Diseño de la wlan de wheelers lane technology college",2008.



- [11] "Single-user MIMO versus multi-user MIMO in distributed antenna systems with limited feedback". EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013.
- [12] Alexis Alfredo Dowhuszko, "Teoría de la Transmisión de Información sobre Canales MIMO Inalámbricos con Múltiples Usuarios", Tesis Doctoral en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, Marzo 2010.
- [13] J.C. Liberti and T.S. Rappaport. "Smart Antennas for Wireless Communications." Prentice Hall, 1999.
- [14] CNMC, "Informe Económico Sectorial de las Telecomunicaciones y el Audiovisual 2015", Madrid, 2015.
- [15] S.A. Grandhi, R. D. Yates, D.J. Goodman, "Resource allocation for cellular radio systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp. 581-587, Agosto 1997.
- [16] Matilde Sánchez Fernández, Santiago Zazo y Reinaldo Valenzuela, "*Performance comparison between beamforming and spatial multiplexing for the downlink in wireless cellular systems IEEE Transactions on Wireless Communications*", vol. 6, no. 7, Julio 2007
- [17] Matilde Sánchez Fernández, Eva Rajo Iglesias, Oscar Quevedo Teruel y M. Luz Pablo Gonzalez, "Spectral Efficiency in MIMO Systems Using Space and Pattern Diversities Under Compactness Constraints", vol. 57, no. 3, Julio 2008